

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Numerická simulace indukčního ohřevu ložisek

Numerical Analysis of Induction Heating of Bearings

2013

Zbyněk Havlák

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Zbyněk Havlák**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Numerická simulace indukčního ohřevu ložisek**
Numerical Analysis of Induction Heating of Bearings

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor problematiky a princip indukčního ohřevu
3. Sestavte numerický model pro FEM analýzu indukčního ohřevu
4. Proveďte vyhodnocení a posouzení výsledků provedených analýz
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- ARTBAUER, Otto. Tepelný výpočet elektrických přístrojů, SVTL Bratislava, 1963, SVŠT Bratislava
- HRADÍLEK, Zdeněk. Elektrotepelná technika, 1996, Ostrava, VŠB-TU Ostrava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

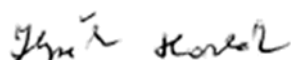
Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval své rodině a panu Ing. Petru Kačorovi, Ph.D., za jeho cenné rady a připomínky k diplomové práci.

V Ostravě dne 7. 5. 2013


.....

Abstrakt:

Ve své diplomové práci se zabývám simulací indukčního ohřevu ložiska pomocí metody konečných prvků. Práci jsem rozdělil na část teoretickou a praktickou. V teoretické části jsem popisoval Maxwellovy rovnice, elektromagnetické pole, hloubku vniku a teorii tepla. V praktické části vyhodnocuji elektromagnetickou a tepelnou analýzu pro různé proudy a frekvence.

Klíčová slova:

Indukční ohřev, přístroj, hloubka vniku, teplo, mesh, FEM.

Abstract:

In my dissertation I deal with a simulation of inductive heat of a bearing using a method of final elements. I divided the thesis into the theoretical part and the practical one. In the theoretical part I describe Maxwell equations, electromagnetic field, the depth of penetration and a theory of heat. In the practical part I evaluate electromagnetic and thermal analysis for various currents and frequencies.

Key Words:

Inductive heat, instrument, the depth of penetration, heat, mesh, FEM.

Seznam značek

a	hloubka vniku	[m]
B	magnetická indukce	[T]
D	elektrická indukce	[C·m ⁻²]
E	intenzita elektrického pole	[V·m ⁻¹]
H	intenzita magnetického pole	[A·m ⁻¹]
J	proudová hustota	[A·m ⁻²]
N	zářivý vektor (Poyntingův)	[W·m ⁻²]
P	výkon	[W]
f	frekvence	[Hz]
I	elektrický proud	[A]
t	čas	[s]
γ	konduktivita (měrná elektrická vodivost)	[S·m ⁻¹]
ε	permitivita	[F·m ⁻¹]
ε_r	relativní permitivita	[-]
μ	permeabilita	[H·m ⁻¹]
μ_r	relativní permeabilita	[-]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
Φ	magnetický indukční tok	[Wb]
ω	úhlová frekvence	[rad·s ⁻¹]
c	měrná tepelná kapacita	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
C	tepelná kapacita	[J·K]
q	měrný tepelný tok	[W·m ⁻²]
α	součinitel přestupu tepla prouděním	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]

OBSAH

1 Úvod	1
2 Teorie indukčního ohřevu	2
2.1 Výhody a aplikace indukčního ohřevu	2
2.2 Princip indukčního ohřevu	3
2.3 Elektromagnetická vlna	5
2.4 Rychlost elektromagnetické vlny	5
2.5 Poyntingův vektor	6
2.6 Maxwellovy rovnice	6
2.7 Obecné elektromagnetické vlnění	8
2.7.1 Rovinné elektromagnetické vlnění	9
2.7.2 Tepelné účinky rovinného vlnění	9
2.7.3 Válcové elektromagnetické vlnění	9
2.7.4 Tepelné účinky válcového vlnění	10
2.7.5 Hloubka vniku	10
2.7.6 Účinnost indukčního zařízení	13
2.8 Teplo	13
2.8.1 Základní tepelné veličiny	13
2.8.2 Šíření tepla	14
2.8.3 Šíření tepla proudění	15
2.8.4 Šíření tepla radiací	16
2.8.5 Oteplovací charakteristika	17
2.9. Indukční ohřívací přístroje	18
3 Vytvoření FEM modelu	22
3.1 Metoda konečných prvků	22
3.2 Základní kroky k FEM analýze obecně	24
3.3 Vytvoření modelu indukčního přístroje	26
3.4 Cíl analýzy	27
3.5 Analýza elektromagnetická	28
3.5.1 Volba materiálů	29
3.6 Tvorba sítě	33
3.6.1 Statistika elementů	34
3.7 Analýza tepelná	35
3.7.1 Volba materiálů	36

4 Vyhodnocení FEM analýzy	37
4.1 Vyhodnocení elektromagnetické analýzy úlohy č. 1	37
4.1.1 Vyhodnocení 50 Hz 10 A	37
4.1.2 Vyhodnocení 50 Hz 15 A	39
4.1.3 Vyhodnocení 50 Hz 20 A	40
4.2 Vyhodnocení tepelné analýzy úlohy č. 1	42
4.2.1 Vyhodnocení 50 Hz 10 A	43
4.2.2 Vyhodnocení 50 Hz 15 A	44
4.2.3 Vyhodnocení 50 Hz 20 A	45
4.3 Srovnání elektromagnetické a tepelné analýzy úlohy č. 1	47
4.4 Vyhodnocení elektromagnetické analýzy úlohy č. 2	52
4.4.1 Vyhodnocení 10 A 100 Hz	52
4.4.2 Vyhodnocení 10 A 150 Hz	53
4.5 Vyhodnocení tepelné analýzy úlohy č. 2	55
4.5.1 Vyhodnocení 10 A 100 Hz	55
4.5.2 Vyhodnocení 10 A 150 Hz	56
4.6 Srovnání elektromagnetické a tepelné analýzy úlohy č. 2	57
5 Závěr	62
6 Literatura	63
7 Příloha	64

1 Úvod

Indukční ohřev je bezkontaktní proces ohřevu elektricky vodivých materiálů využívající střídavého elektromagnetického pole. Jelikož není nutný kontakt ohřívaného materiálu se zdrojem energie, nedochází k žádnému typu kontaminace způsobené technologií ohřevu. Vzhledem k tomu, že teplo vzniká ve skutečnosti až v ohřívaném předmětu, jedná se o velice efektivní metodu. Indukční ohřev je tedy výhodný pro svou rychlost ohřevu tělesa. Tyto a další důvody popsané v této diplomové práci dělají z indukčního ohřevu technologii, která je oproti konvenčním metodám ohřevů unikátní a v některých průmyslových aplikacích nenahraditelná.

Ve své diplomové práci se konkrétně zabývám indukčním ohřevem ložisek, pro účely analýzy jsem si navrhl vlastní model indukčního ohřevu ložisek. Svou práci jsem rozčlenil na část teoretickou a praktickou. V části teoretické popisuji teorii indukčního ohřevu, obecné elektromagnetické vlnění ve vodivé a nevodivé části, hloubku vniku, teorii tepla a přístroje indukčního ohřevu ložisek. V části praktické řeším simulaci pomocí FEM analýzy. Pro účely diplomové práce jsem si zhotovil model indukčního přístroje a jako ohříváný materiál jsem zvolil ložisko, které jsem vytvořil v programu CAD firmy SolidWorks. Poté jsem tento model simuloval pomocí metody konečných prvků (FEM) v programu ANSYS. V programu jsem vytvořil simulaci elektromagnetických veličin, provedl tepelnou analýzu. Pro každý model jsem vytvořil několik simulací, nejprve pro frekvenci 50 Hz a proudy 10 A, 15 A, 20 A. Ve druhé části jsem nastavil proud 10 A s proměnnou frekvencí 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz.

2 Teorie indukčního ohřevu

2.1 Výhody a aplikace indukčního ohřevu

Jako důkaz výjimečnosti technologie jsou níže vybrány aplikace, ve kterých je použití indukčního ohřevu výhodným a v některých případech i jediným možným řešením. Použitelnost indukčního ohřevu je velmi široká a v průmyslu se stále častěji zavádí právě kvůli výše zmíněným výhodám. Indukční ohřev se v praxi používá při pájení, kalení, popouštění, žihání, tavení, svařování, zpracování za tepla, tváření.

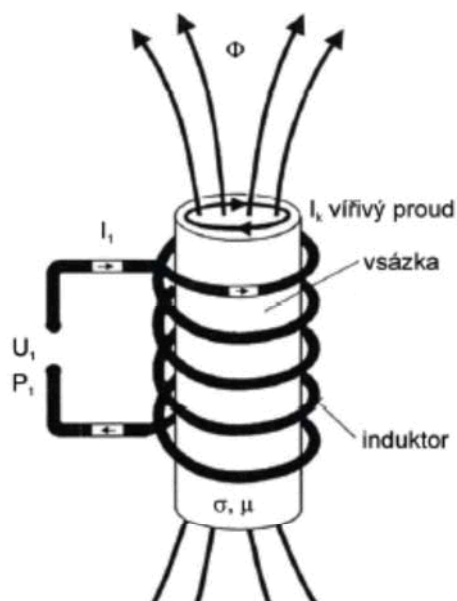
Aplikace jsou vybrány tak, aby reprezentovaly nějakou z výhod:

- sériové ohřevy. Díky naprosto přesnému dávkování výkonu vyniká indukční ohřev svou opakovatelností. Je tedy s výhodou používán při sériových ohřevech a předehřevech, kde je kladen důraz na přesnost dosažených teplot.
- vysoká energetická efektivita. Jelikož vzniká teplo až v ohřívaném předmětu samotném, nedochází ke ztrátám přenosovou cestou. Ztráty vznikají pouze únikem tepla z ohřívaného objektu a ztrátami vzniklými v induktoru, kterým prochází velký proud.
- nízké prostorové nároky. Velikost zdroje indukčního ohřevu se liší hlavně podle jeho výkonu. Celé zařízení však zpravidla vyžaduje nejmenší možné rozměry v porovnání se zařízením ostatních metod ohřevu.
- snadná regulace.
- žádné chemické působení – ohřívaný materiál není vystaven žádnému působení látek vzniklých metodou ohřevu ani kontaktu s jiným materiálem, nedochází tak k nežádoucímu ovlivňování vlastností vsázky během ohřevu (na rozdíl od ohřevu plamenem).
- čisté pracovní podmínky – žádné znečištění kouřem nebo jinými agresivními látkami znečišťujícími okolní prostředí.

2.2 Princip indukčního ohřevu

Jestliže vodivý předmět (vsázku) vložíme do střídavého magnetického pole, indukují se do vsázky vířivé proudy, které v ní cirkulují díky její vodivosti. Indukční teplo vzniká při dopadu elektromagnetického vlnění na vodivou plochu. Energie elektromagnetického vlnění se spotřebuje na uvedení do pohybu volných elektronů v materiálu stěny. Elektrony se pohybují v látce a narážejí na molekuly materiálu, vzniká Joulovo teplo. Doprava tepla do vsázky se neděje tepelným spádem z cizího zdroje tepla, jako například u nepřímého odporového zařízení. Teplo se do vsázky dopravuje střídavým elektromagnetickým polem, a tak vzniká přímo v elektricky vodivé vsázce. Teplo vzniká

pouze ve vsázce, která není s ničím mechanicky vázaná. Proměnný indukční tok vyvolá indukované napětí, které vyvolá indukovaný proud. Na obr. č. 1 je znázorněn princip indukčního ohřevu tepla [1], [2].



Obr. č. 1: Princip indukčního ohřevu

Typy indukčního ohřevu podle frekvence:

- indukční ohřevy s nízkým kmitočtem (50 Hz – 150 Hz)
- indukční ohřevy se středním kmitočtem (150 Hz – 10 kHz)
- indukční ohřevy s vysokým kmitočtem (10 kHz – 10 MHz)

Indukované napětí je obecně vyjádřeno vztahem:

$$u(t) = -N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (1)$$

N - počet vodičů

$\phi(t)$ - indukční mag. tok (Wb)

Proud induktoru je harmonický a je vyjádřen vztahem:

$$i_1(t) = I_1 \sin(\omega t) \quad (2)$$

Magnetický tok bude mít také harmonický průběh a jeho vztah bude:

$$\phi_{1max}(t) = \frac{U_{1max}}{N_1 \omega} \quad (3)$$

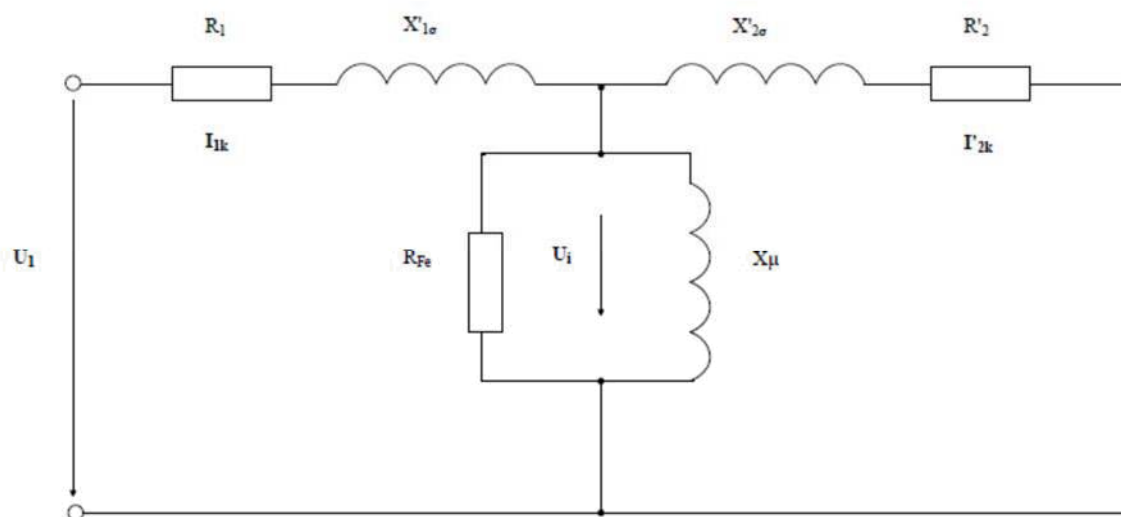
Po úpravě indukovaného napětí získáme toto vyjádření:

$$\phi_{1max}(t) = \frac{U_{1max}}{N_1 \omega} = \frac{U_1 \sqrt{2}}{\omega N_1} = \frac{U_1}{4,44 f N_1} \quad (4)$$

Vyjádřením indukovaného napětí U_i získáme známý vztah v elektrických strojích:

$$U_i = 4,44 f N_1 \phi_{1max} \quad (5)$$

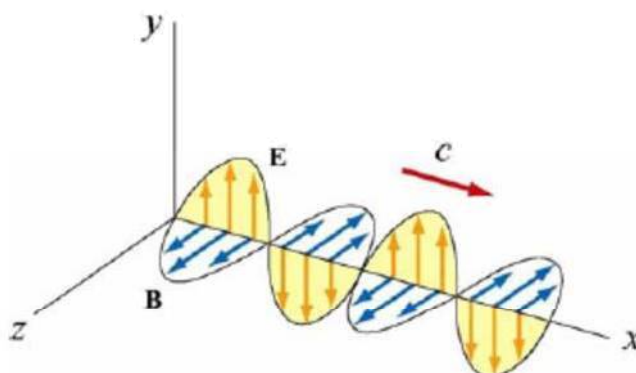
Indukční ohřev ložisek je v principu transformátor ve stavu nakrátko. Skládá se z magnetického obvodu, který je složen z elektrolechů, primárního a sekundárního obvodu. Sekundární obvod je tvořený závitem nakrátko. Náhradní schéma indukčního ohřevu ložisek je zobrazeno na obr. č. 2, kde U_1 je vstupní napětí, R_1 vstupní odpor, $X'_{1\sigma}$ je rozptylová reaktance vstupního vinutí, R'_2 výstupní odpor, $X'_{2\sigma}$ je rozptylová reaktance výstupního vinutí, R_{Fe} odpor, který respektuje ztráty v železe, X_μ je magnetizační reaktance, I_{1k} je vstupní proud, I'_{2k} je výstupní proud nakrátko [8].



Obr. č. 2: Náhradní zobrazení ložisek indukčního ohřevu

2.3 Elektromagnetická vlna

Elektromagnetická vlna má dvě části – část elektrickou a magnetickou. Elektrická složka je vyjádřena vektorem elektrické intenzity **E**, magnetická vektorem magnetické indukce **B**. Vektory **B** a **E** jsou vzájemně kolmé, v postupné elektromagnetické vlně mají souhlasnou fázi a současně jsou kolmé ke směru šíření vlny. Magnetické pole se sinusoidně mění a kolmo k němu vzniká pole elektrické. Tato dvě pole vytvářejí jedno pole díky indukci a ve výsledku je to vlna elektromagnetická. Elektromagnetické vlnění je příčné. Na obr. č. 3 je patrné, že obě pole dosahují minimálních a maximálních hodnot ve stejných časech, vektory **B** a **E** jsou ve fázi [4].



Obr. č. 3: Elektromagnetická vlna

2.4 Rychlost elektromagnetické vlny

Rychlost elektromagnetické vlny vyjadřujeme následujícím vztahem, tento vztah platí ve vakuu:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (6)$$

kde $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ je permitivita vakua

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ je permeabilita vakua

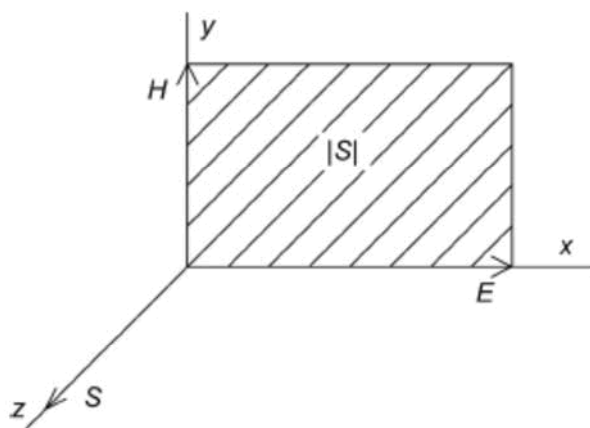
Pro rychlost elektromagnetické vlny v materiálu platí:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

2.5 Poyntingův vektor

Poyntingův vektor určuje směr a hustotu toku elektromagnetické energie v prostoru za jednotku času W/m^2 . Jeho velikost je dána plochou rovnoběžníku určeného součinem vektorů \mathbf{E} a \mathbf{H} . Poyntingův vektor je zobrazen na obr. č. 4. Jeho vyjádření je dle vztahu [2], [4]:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (7)$$



Obr. č. 4: Poyntingův vektor

2.6 Maxwellovy rovnice

K teorii elektromagnetických jevů přispěl J. C. Maxwell (1831–1879). Zákony elektromagnetického pole, Coulombův zákon, Gaussovu větu elektrostatiky, Ampérův zákon celkového proudu, Faradayův indukční zákon, Biot-Savartův zákon, zákon zachování náboje a Ohmův zákon shrnul do vzájemných obecných souvislostí v soustavě rovnic, které nazýváme Maxwellovy rovnice. Elektromagnetické pole je popsáno čtyřmi Maxwellovými rovnicemi. Maxwellovy rovnice je možné sepsat v integrálním nebo diferenciálním stavu [2].

a) První Maxwellova rovnice

Maxwellova rovnice představuje Ampérův zákon celkového proudu doplněný Maxwellem o posuvný proud.

$$\text{Integrální tvar} \quad \oint_c \mathbf{H} d\mathbf{l} = J + \frac{d\psi}{dt} \quad (8)$$

$$\text{Diferenciální tvar} \quad \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (9)$$

b) Druhá Maxwellova rovnice

Tato rovnice představuje Faradayův indukční zákon. Cirkulace vektoru \mathbf{E} po orientované křivce l je rovna záporně vzaté časové změně magnetického toku, který prochází plochou ohraničenou l .

$$\text{Integrální tvar} \quad \oint_C \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (10)$$

$$\text{Diferenciální tvar} \quad \text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (11)$$

c) Třetí Maxwellova rovnice

Tato rovnice vyjadřuje Gaussovu větu elektrostatiky pro tok elektrické indukce.

$$\text{Integrální tvar} \quad \oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = Q \quad (12)$$

$$\text{Diferenciální tvar} \quad \text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (13)$$

d) Čtvrtá Maxwellova rovnice

Tato rovnice představuje zákon kontinuity siločar magnetické indukce.

$$\text{Integrální tvar} \quad \oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0 \quad (14)$$

$$\text{Diferenciální tvar} \quad \text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (15)$$

Vektory \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{B} , \mathbf{D} , \mathbf{J} jsou navzájem spojeny obecně složitými, tzv. materiálovými vlastnostmi. Vztahy jsou též funkcemi fyzikálních veličin, zjednoduší se pro lineární izotropní prostředí na:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (16)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (17)$$

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (18)$$

V rovnicích je permeabilita a permitivita vyjádřena jako:

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

$$\text{kde:} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \quad \text{je permeabilita vakua} \quad (19)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

$$\text{kde:} \quad \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} \quad \text{je permitivita vakua} \quad (20)$$

2.7 Obecné elektromagnetické vlnění

Rovnice obecného vlnění ve vodivém a nevodivém prostředí se odvodí z Maxwellových rovnic v základním tvaru. Pomocí těchto vztahů se dají odvodit rovnice vlnění pro \mathbf{H} a \mathbf{E} . Mají tento tvar [1]:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (21)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (22)$$

$$\text{div } \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho_V \quad (23)$$

$$\text{div } \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = 0 \quad (24)$$

Pomocí dalších úprav získáme tyto vztahy, kde platí ($\rho_V = 0$), ($\gamma = 0$). Pro vodivé prostředí platí:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_0 \mu_r} \left[\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} \right] \quad (25)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_0 \mu_r} \left[\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} \right] \quad (26)$$

A v nevodivém prostředí platí:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r} \left[\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} \right] \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r} \left[\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} \right] \quad (28)$$

2.7.1 Rovinné elektromagnetické vlnění

Zdrojem rovinného elektromagnetického vlnění je rovná vodivá stěna, kterou prochází střídavý proud. Dopadá na rovnou stěnu. Každý bod roviny teoreticky vyzařuje kolmo k protilehlé stěně, což vyjadřuje Poyntingův vektor. Platí:

$$\frac{\partial E}{\partial y} = \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad (29)$$

2.7.2 Tepelné účinky rovinného vlnění

Elektromagnetická vlna vyvolá indukovaný proud, který vytvoří tepelné účinky. Množství tepla se vyjádří v rovinném vlnění z jedné strany jako:

$$P = \frac{1}{2\alpha\gamma} H^2 \quad (30)$$

2.7.3 Válcové elektromagnetické vlnění

Při rozboru válcových částí se elektromagnetické vlnění řeší pomocí válcového elektromagnetického vlnění. Zdrojem válcového elektromagnetického vlnění je válcová plocha nekonečné délky, již protéká proud o určité proudové hustotě. Elektromagnetické vlnění má v tomto případě také exponenciální průběh, a to od vnějšího povrchu k ose vsázky. Vlnové rovnice válcové elektromagnetické vlny pro všeobecné prostředí mají tvar pro \mathbf{H} :

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} + \frac{\partial \mathbf{H}}{r \partial r} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (31)$$

a pro \mathbf{E} platí:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial r^2} + \frac{\partial \mathbf{E}}{r \partial r} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (32)$$

kde k je konstanta závislá na materiálových vlastnostech.

Řešení válcového elektromagnetického vlnění se řeší pomocí Besselových funkcí.

Besselova funkce má obecné vyjádření:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial y}{x \partial x} + \left(1 - \frac{n^2}{x^2}\right) y = 0 \quad (33)$$

kde n udává řád rovnice a její obecné vyjádření je ve tvaru:

$$y = C_1 J_n(x) + C_2 Y_n(x) \quad (34)$$

kde C_1, C_2 - integrační konstanty

$J_n(x)$ - Besselova funkce 1. druhu, řádu n a argumentu x

$Y_n(x)$ - Besselova funkce 2. druhu, řádu n a argumentu x

2.7.4 Tepelné účinky válcového vlnění

Elektromagnetická válcová vlna vytvoří indukovaný proud, který vytvoří tepelné účinky. Množství tepla se vyjádří ve válcovém vlnění ohřívaného tělesa jako:

$$P = \pi \rho \int_0^{r_2} J^2 r dr \quad (35)$$

2.7.5 Hloubka vniku

Vektory \mathbf{E} a \mathbf{H} lze přepsat do fázorů v komplexní rovině na:

$$\mathbf{E} = E_m e^{j\omega t} \quad (36)$$

$$\mathbf{H} = H_m e^{j\omega t} \quad (37)$$

Pro prostředí vodivé platí tento vztah:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_0 \mu_r} \left[\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} \right] \quad (38)$$

Po zjednodušení působení elektromagnetického pole jedním směrem na plochu získám zjednodušený vztah:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_0 \mu_r} \left[\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} \right] \quad (39)$$

$$\mathbf{H} = H_m e^{j\omega t} \text{ derivace} \quad \frac{d\mathbf{H}}{dt} = j\omega \mathbf{H} \quad (40)$$

Úpravou bude

$$\frac{d^2 \mathbf{H}}{dx^2} - j\gamma\mu_0\mu_r\omega\mathbf{H} = 0 \quad (41)$$

Získali jsme homogenní diferenciální rovnici 2. řádu:

$$H_0 = C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t} \quad (42)$$

Jejím řešením je:

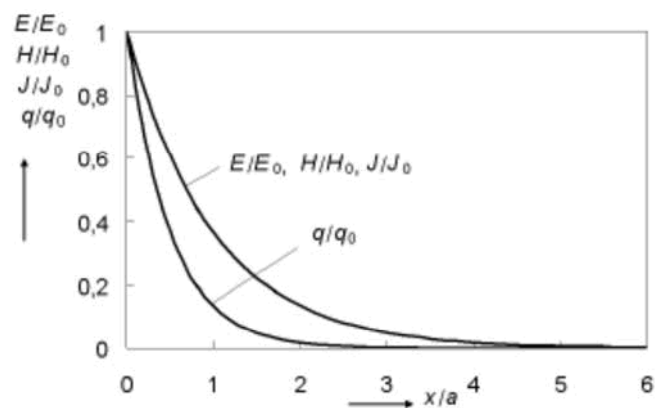
$$\alpha_{1,2} = \pm\sqrt{j\gamma\mu\omega} = \pm(1+j)\sqrt{\frac{j\gamma\mu\omega}{2}} = \mp\frac{1+j}{a} \quad (43)$$

kde hloubka vniku je vyjádřena:

$$a = \sqrt{\frac{2}{\gamma\mu_0\mu_r\omega}} \quad [\text{m}] \quad (44)$$

kde μ_0 - permeabilita vakua $\left(\frac{\text{H}}{\text{m}}\right)$
 μ_r - permeabilita poměrná $(-)$
 ω - úhlová rychlost $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
 γ - měrná vodivost $\left(\frac{\text{S}}{\text{m}}\right)$

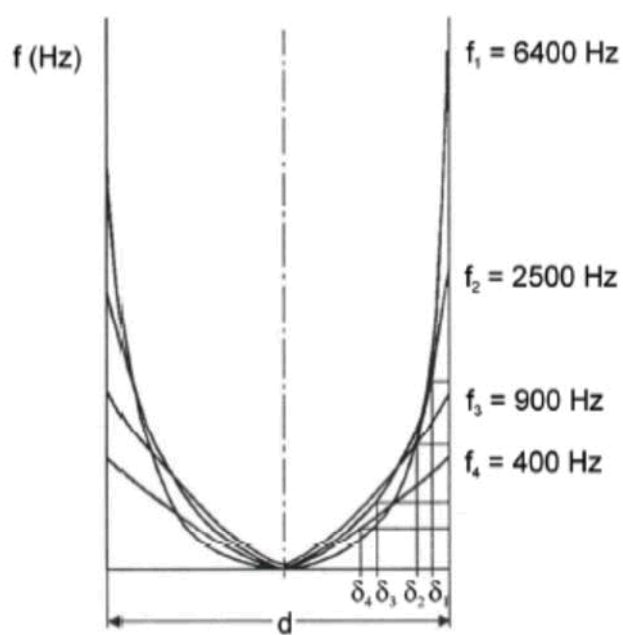
Intenzita pole má dvě složky – postupující a odraženou vlnu. Přičemž vlna postupující se postupně utlumuje. V tomto případě uvažuji, že pokud bude tloušťka rozhraní nekonečná, odražená vlna z důvodu útluu postupující se vlny nenastane. Vzhledem ke vzdálenosti hloubky vniku se zmenší vlna H, J, E na 36,8 % původní hodnoty. V hloubce $x = 2a\pi$ se utlumí $e^{-2\pi}$ krát. V hloubce vniku a se vytvoří 86,8 % tepla ve vsázce. Na obr. č. 5 je znázorněný průběh amplitud, které mají exponenciální tvar. Postupující se vlna se utlumí, pokud vzdálenost x je rovna 6násobku hloubky vniku. V takovém případě nenastane zpětný odraz vln. Hloubka vniku vyjadřuje tloušťku povrchové vrstvy, ve které proud konstantní hustoty vyvolá stejné Jouleovy ztráty jako ve vodiči. Na obr. č. 6 je zobrazen vliv frekvence elektromagnetické vlny. V tabulce č. 1 jsou zobrazeny hloubky vniku materiálů Cu, Al a oceli při různých teplotách [2].



Obr. č. 5: Rozložení elektromagnetické vlny

Tab. č. 1: Hloubka vniku

Frekvence (Hz)	Hloubka vniku (mn)					
	Cu		Al		Ocel	
	20 °C	1100 °C	20 °C	660 °C	20 °C	800 °C
50	9,5	31,8	12,2	31,5	8	71,2
$10 \cdot 10^2$	2,1	7,1	2,7	7	1,8	15,9
$10 \cdot 10^4$	0,67	2,25	0,86	2,2	0,56	5
$10 \cdot 10^5$	0,067	0,22	0,086	0,22	0,056	0,5



Obr. č. 6: Rozložení elektromagnetické vlny

2.7.6 Účinnost indukčního zařízení

Důležitou součástí indukčního zařízení je induktor. Je tvořen cívkou. Aby byla jeho účinnost co nejvyšší, musí mít co nejmenší rozptyl. Musí mít co neblíží geometrickou vazbu s ložiskem. Indukční ohřev ložisek, který je tématem mé diplomové práce, je analyzován u modelu, který má nástavec magnetického obvodu z kvalitních elektrolechů. Induktor musí být co nejlíže tvaru ohřivaného tělesa. Účinnost válcových těles je vyjádřen podle vztahu [3]:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \left(1 + 6,25 \frac{a^2}{d^2} \right) \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}} \quad (45)$$

D - průměr induktoru

d - průměr vsázky

a - hloubka vniku

ρ_1 - měrný odpor materiálu induktorem

ρ_2 - měrný odpor materiálu ohřivaného tělesa

μ - poměrná permeabilita

2.8 Teplo

Teplota je stavová veličina, která je mírou celkové vnitřní tepelné soustavy. Je to veličina, kterou můžeme měřit. Teplo je míra změny vnitřní energie systému při styku s jiným systémem, aniž by přitom docházelo ke konání práce. Indukční ohřev je složitý elektromagnetický a tepelný jev. Značí se písmenem Q a jeho základní jednotkou je joule [J]. Přenosy tepla jsou [2]:

- a) Vedením (kondukcí)
- b) Prouděním (konvencí)
- c) Sáláním

2.8.1 Základní tepelné veličiny

Součinitel tepelné vodivosti λ udává schopnost materiálu vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří ze zahřáté části látky do jiné. Určuje ji součinitel tepelné vodivosti a je definována jako množství tepla prošlé za jednotku času tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový teplotní spád. Veličinu lze také definovat jako výkon (neboli teplo za jednotku času) procházející každým čtverečním metrem tělesa tlustého jeden metr, jehož strana má teplotu o 1 kelvin vyšší než druhá.

Součinitel přestupu tepla α představuje ztráty ve watttech, které těleso odevzdá okolnímu prostředí o jednom metru čtverečním chladícího povrchu při rozdílu teploty tělesa a prostředí o jeden teplotní stupeň.

Měrná tepelná kapacita (někdy označovaná jako měrné teplo) c je množství tepla potřebného k ohřátí jednoho kilogramu látky o jeden teplotní stupeň. V přesnějších výpočtech se musí uvést, ke které teplotě se vztahuje, protože je zčásti závislá na teplotě.

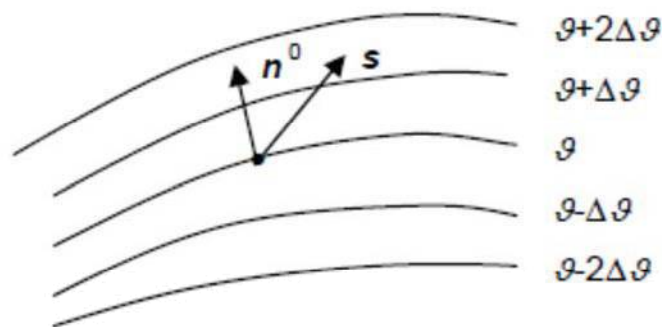
Tepelná kapacita C určuje schopnost konkrétního množství látky jímat teplo.

2.8.2 Šíření tepla vedením

Vedení je základní způsob šíření tepla v tělesech. Přenos tepla vedením je charakteristický pro tuhé látky a vždy vázaný na rozložení teploty v látce. Fyzikálně lze tento děj definovat tak, že jde o částečné předávání pohybové energie částic s vyšší střední kinetickou energií do oblasti s částicemi s nižší střední kinetickou energií. Částice se přitom nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Vedení tepla se může rozdělit na:

- ustálené (stacionární) vedení tepla – teplotní rozdíl v čase mezi jednotlivými částmi soustavy se v čase nemění $\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = 0$
- neustálené (nestacionární) vedení tepla – teplotní rozdíl mezi jednotlivými částmi tělesa, mezi kterými se teplo přenáší, se postupně vyrovnává $\frac{\partial \vartheta}{\partial t} \neq 0$

Plochy, které mají stejné teploty, se nazývají izotermy. Tepelný stav takového prostředí je určen teplotním polem, tj. množinou okamžitých teplot všech bodů zkoumané části prostoru. Na obr. č. 7 jsou zobrazeny izotermy.



Obr. č. 7: Izotermy

Závislost mezi tepelným tokem a teplotním gradientem (spádem) je definována Fourierovým zákonem a vyjadřuje se jako:

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta \quad (46)$$

2.8.3 Šíření tepla prouděním

Proudění je difúzní přenos tepla v kapalinách nebo plynech, při kterém dochází ke spolupráci částic při přemísťování těchto částic. Proudění může být přirozené, nebo nucené. Zda se jedná o laminární, nebo nucené proudění, vyjadřuje Reynoldsovo číslo Re . Reynoldsovo číslo vyjadřuje charakter pohybu částic v prostředí. Do určité meze se rozlišuje, jestli je proudění turbulentní, nebo laminární. Při přestupu tepla prouděním je rozhodující teplotní součinitel přestupu tepla. Teplotní součinitel závisí na mnoha faktorech, jakými jsou tlak, hustota, rychlost proudění, povrchová teplota stěny, směr proudění, tvar tělesa. Teoretické odvození součinitele přestupu tepla přesahuje rámec tohoto článku. Pro standardní konfigurace různě orientovaných ploch a rozdílů teplot je možné součinitel přestupu tepla určit s pomocí experimentů. K vysokému počtu, na kterém závisí součinitel přestupu tepla α , se používá teorie podobnosti. V tabulce č 2 jsou zobrazené některé údaje známých součinitelů přestupů tepla. Šíření tepla prouděním (konvencí) vyjadřuje Newtonův vztah:

$$\mathbf{q}_k = \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) \quad (47)$$

kde α je součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] a $\vartheta_1 - \vartheta_0$ je teplotní rozdíl těles (K).

Tab. č. 2: Hodnoty součinitele přestupu tepla

Konvekce	α	
	α_{\min}	α_{\max}
Klidný vzduch	12,5	125
Proudící vzduch	40	2 100
Proudící kapalina	8 400	21 100
Vroucí kapalina	16 800	25 100
Kondenzující páry	29 000	50 000

2.8.4 Šíření tepla radiací

Radiace neboli vyzařování či sálání je způsob šíření tepla bez přítomnosti hmoty. Teplo se šíří prostřednictvím elektromagnetického záření. Ve svém důsledku se nejedná o teplo jako takové, ale o energii elektromagnetických vln, která se může na teplo změnit, anebo může být teplem (tělesem o vysoké teplotě) generována. Záření pak po dopadu na hmotu může být absorbováno, odraženo, nebo hmotou prochází. Platí:

- A - absorpce
- B - reflexe
- C - prostupující tok

$$A + B + C = 1 \quad (48)$$

Každé těleso, jehož teplota je vyšší než 0 K, vyzařuje svým povrchem tepelnou energii. Toto elektromagnetické vlnění se v průzračném prostředí šíří přímočaře a všemi směry. Při průchodu z jednoho průzračného prostředí do druhého se šíří podle zákonů geometrické optiky. Každé těleso vyzařuje, ale také absorbuje energii vyzařovanou jinými tělesy. Při dopadu tepelného záření na částečně průzračné těleso se část energie pohltí, část se odrazí a část projde tělesem.

Lze definovat a rozlišovat teploty podle typu povrchu těles. Absolutní černý povrch tělesa definujeme jako teoretický povrch, který má jednotkovou emisivitu v celém rozsahu vlnových délek, absorbuje všechnu radiační energii. Emisivita reálného tělesa je definována jako poměr radiačních energií emitovaných z povrchu daného tělesa a tělesa černého při stejné teplotě. Definujeme potom tepelný tok:

$$\phi = M \cdot S = \delta \cdot T^4 \cdot S \quad (49)$$

σ - Stefan-Bolzanova konstanta $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}\text{)}$,

T - termodynamická teplota (K).

2.8.5 Oteplovací charakteristika

Je přirozený stav tělesa nacházejícího se ve stabilním rovnovážném stavu nebo do něj přecházejícího. Přenos energie lze popsat zákonem zachování energie. Jedno těleso energii přijímá a druhé odevzdává. Jsou-li tělesa v rovnovážném stavu, nepřijímají ani neodevzdávají žádnou energii. V elektrickém obvodu se část tepelných ztrát odvede ochlazováním. Zbylé tepelné ztráty zůstávají v tělese a zvyšují jeho teplotu. Průběh oteplení má exponenciální charakter. Z počáteční nulové hodnoty narůstá stále pomaleji, až se v době $t \rightarrow \infty$ ustálí na hodnotě maximálního oteplení a nastane tepelná rovnováha. Časovou konstantu T lze definovat jako dobu, za kterou by těleso dosáhlo ustáleného oteplení $\Delta\vartheta_\infty$, kdyby bylo všechno uvolněné teplo spotřebováno pouze pro zvyšování své teploty, tj. součinitel přestupu tepla by byl roven nule. Těleso dosáhne ustálené teploty za $5T$. Oteplovací charakteristika je zobrazena na obr. č. 8. Rovnice tepelné rovnováhy vyjadřuje vztah [7]:

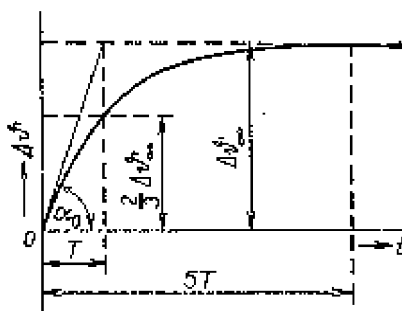
$$Pdt = Cd(\Delta\vartheta) + \alpha S \Delta\vartheta dt \quad (50)$$

Po úpravě na diferenciální rovnici se pro výpočet oteplování udává rovnice:

$$\Delta\vartheta = \frac{P}{S\alpha} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (51)$$

kde časová konstanta je definována jako:

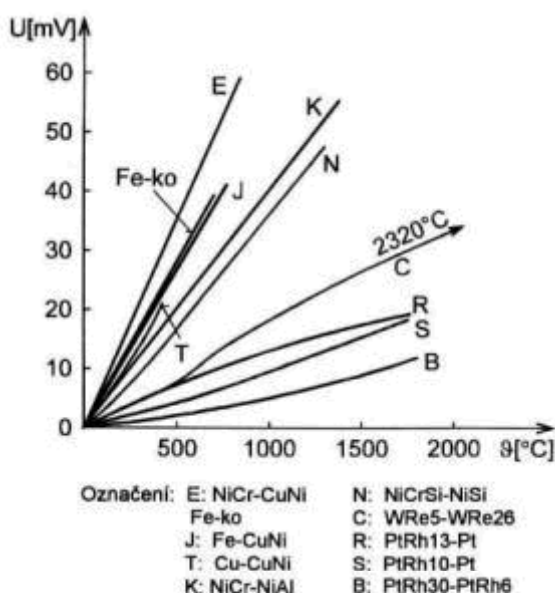
$$T = \frac{C}{\alpha S}$$



Obr. č. 8: Graf oteplovací charakteristiky

2.9 Indukční ohřívací přístroje

Indukční ohřívací přístroje jsou moderní přístroje, které mohou ohřívát všechny vodivé materiály. Jsou nahraditelné vzhledem k předchozím způsobům ohřívání ložisek, např. v olejové lázni, různé typy el. pecí. Jsou ekologické, nevznikají žádné zplodiny. Další výhoda, kvůli které se obecně používá indukční ohřev, je rychlost ohřevu. Indukční ohříváč se skládá z cívky, magnetického obvodu a řídicí elektroniky. Magnetický obvod lze různě upravovat dle rozměrů ohřívaných výrobků. Výrobci umožňují řízení výkonu pomocí elektronické regulace, v nejjednodušším případě dva stupně výkonu, nebo řízení po 20 % výkonu. Veškeré údaje jsou zobrazeny na přehledném displeji. Ložiska se ohřívají jen do 125 °C, aby nedošlo k poškození ložiska změnami ve struktuře. Technické možnosti ohřevu dle výrobce umožňují až 400 °C. Jelikož se ložisko magnetizuje, musí se po ohřátí demagnetizovat, tato funkce je do přístroje již integrována. K udržení teploty se na ohřívací těleso přikládá teplotní snímač typu J, v některých případech snímač K. Snímač je založen na principu vzniku termoelektrického napětí, tzv. Seebeckův jev, závislost teplotního napětí na teplotě je zobrazena na obr. č. 9. Výrobci dodávají dostatečnou nabídku přístrojů různých výkonů od 400 VA až do 30 KVA. Jako výrobce těchto produktů bych uvedl firmu SKF Ložiska, a.s., Simatec, a.s., Betex, a.s. Na obr. č. 10 je zobrazen přístroj indukčního ohřevu ložisek a na obr. č. 11 jsou přehledně zobrazeny katalogové údaje přístrojů firmy Simatec a.s., na obr. č. 12 jsou zobrazeny údaje firmy Betex.



Obr. č. 9: Závislost teplotních napětí [11]



Obr. č. 10: Indukční přístroj ložisek [12]

- A - Cívka
- B - Podstavec tělesa
- C - Teplotní snímač s ložiskem
- D - Elektronika
- E - Konstrukce ohřívacího přístroje
- F - Držadlo
- G - Magnetický obvod s tyčí



Popis	Ohrievacia platňa HPS a HPL	IH 030	IH 070	IH 090
Názov	Ohrievač pre malé diely	Ohrievač pre malé a stredné diely	Ohrievač pre malé a stredné diely	Ohrievač s ventilátorom na chladenie pre stôlu prevádzku pre malé a stredné diely
Napätie V/Hz *	230 V/50 Hz alebo 110 V/60 Hz	230 V/50 Hz alebo 110 V/60 Hz	230 V/50 Hz alebo 110 V/60 Hz	400 V/50 Hz – 460 V/60 Hz 500 V/50 Hz – 575 V/60 Hz
Diel pre ohrievanie - maximálna hmotnosť - priemer otvoru	HPS 5 kg / HPL 10 kg –	30 kg 20 – 400 mm	80 kg 20 – 400 mm	120 kg 20 – 400 mm
Nastavenie teploty - rozsah - magnetická sonda - presnosť (elektronika)	50 – 200 °C – ± 5 °C	0 – 250 °C áno, typ J ± 3 °C	0 – 250 °C áno, typ K ± 3 °C	0 – 250 °C áno, typ K ± 3 °C
Nastavenie času - rozsah - presnosť	– – –	0 - 60 minút ± 0.01 sekúnd	0 - 60 minút ± 0.01 sekúnd	0 - 60 minút ± 0.01 sekúnd
Maximálna teplota (približne)	200 °C	400 °C	400 °C	400 °C
Režim termometra	nie	áno	áno	áno
Režim teploty ložiska	nie	áno	áno	áno
Redukcia výkonu	nie	nie	4-stupne / 20-40-60-80%	4-stupne / 20-40-60-80%
Automatická demagnetizácia zvyškový magnetizmus	nie –	áno ≤ 2A/cm	áno ≤ 2A/cm	áno ≤ 2A/cm
Možnosť ohrievania ložísk s tesnením	áno	áno	áno	áno
Možnosť ohrievania predmazaných ložísk	áno	áno	áno	áno
Kódy chybových hlásení	nie	áno	áno	áno
Ochrana voči tepelnému preťaženiu	nie	áno	áno	áno
Max. magnetický tok	–	1,5 T	1,5 T	1,5 T
Kontrolný panel	Hlavný vypínač, nastavenie teploty	Panel s LED displayom	Panel s LED displayom	Panel s LED displayom
Veľkosť pracovnej plochy (WxH)	HPS 380x180 mm (WxD) HPL 380x380 mm (WxD)	130 x 95 mm	145 x 205 mm	145 x 205 mm
Priemer cievky	–	–	115 mm	115 mm
Rozmery (WxDxH)	HPS 380 x 180 x 50 mm HPL 380 x 380 x 200 mm	290 x 255 x 255 mm	420 x 280 x 345 mm	420 x 280 x 420 mm
Celková hmotnosť vrátane ramien	HPS 5 kg HPL 10 kg	27 kg	35 kg	28 kg
Maximálna spotreba elektr. energie	HPS 1.0 kVA / HPL 2.0 kVA	3,7 / 2,2 kVA	3,7 / 2,2 kVA	6,4 / 7,4 kVA
Počet štandardných ramien	–	3	3	3
Štandardné rameno	–	55 x 55 x 240 mm pre ložiská s priemerom diery od 78 mm 28 x 28 x 240 mm pre ložiská s priemerom diery od 40 mm 14 x 14 x 240 mm pre ložiská s priemerom diery od 20 mm	55 x 55 x 275 mm pre ložiská s priemerom diery od 78 mm 28 x 28 x 275 mm pre ložiská s priemerom diery od 40 mm 14 x 14 x 275 mm pre ložiská s priemerom diery od 20 mm	55 x 55 x 275 mm pre ložiská s priemerom diery od 78 mm 28 x 28 x 275 mm pre ložiská s priemerom diery od 40 mm 14 x 14 x 275 mm pre ložiská s priemerom diery od 20 mm
Hlavný prierez	–	55 x 55 mm	55 x 55 mm	55 x 55 mm
Uloženie ramena	–	áno	áno, interný	áno, interný
Posuvné rameno	–	–	nie	–
Otočné rameno	–	–	voľiteľný	áno
Chladiaci ventilátor	–	–	–	štandard

Obr. č. 11: Ukážka katalogových údajů indukčního přístroje firmy Simatec [9]

	Standard series		TURBO series	
3,6 kVA Page 10-11	Betex 22 ELD portable Min. ID Ø: 10 mm Max. OD Ø: 240 mm For bearings up to ± 15 kg			Betex 24 RLD TURBO portable Min. ID Ø: 10 mm Max. OD Ø: 350 mm For bearings up to ± 40 kg
3,6 kVA Page 12-13	Betex 22 ESD Min. ID Ø: 15 mm Max. OD Ø: 340 mm For bearings up to ± 40 kg			Betex 24 RSD TURBO Min. ID Ø: 15 mm Max. OD Ø: 520 mm For bearings up to ± 95 kg
8 kVA Page 14-15	Betex 38 ESD Min. ID Ø: 30 mm Max. OD Ø: 480 mm For bearings up to ± 125 kg			Betex 40 RSD TURBO Min. ID Ø: 30 mm Max. OD Ø: 790 mm For bearings up to ± 350 kg
12 kVA Page 16-17	Betex 38 ZFD Min. ID Ø: 30 mm Max. OD Ø: 720 mm For bearings up to ± 280 kg			Betex 40 RMD TURBO Min. ID Ø: 60 mm Max. OD Ø: 920 mm For bearings up to ± 600 kg
24 kVA Page 18-19	Betex SUPER Min. ID Ø: 60 mm Max. OD Ø: 1300 mm For bearings up to ± 600 kg			Betex SUPER TURBO Min. ID Ø: 145 mm Max. OD Ø: 1700 mm For bearings up to ± 1200 kg
40-48- 100 kVA Page 20-21	Betex GIANT Min. ID Ø: 85 mm Max. OD Ø: 1400-2500 mm For bearings from ± 1500 up to ± 3500 kg			Betex GIANT TURBO Min. ID Ø: 115 mm Max. OD Ø: 1400-2500 mm For bearings from ± 1500 up to ± 12000 kg

Obr. č. 12: Ukázka katalogových údajů indukčního přístroje firmy Betex [13]

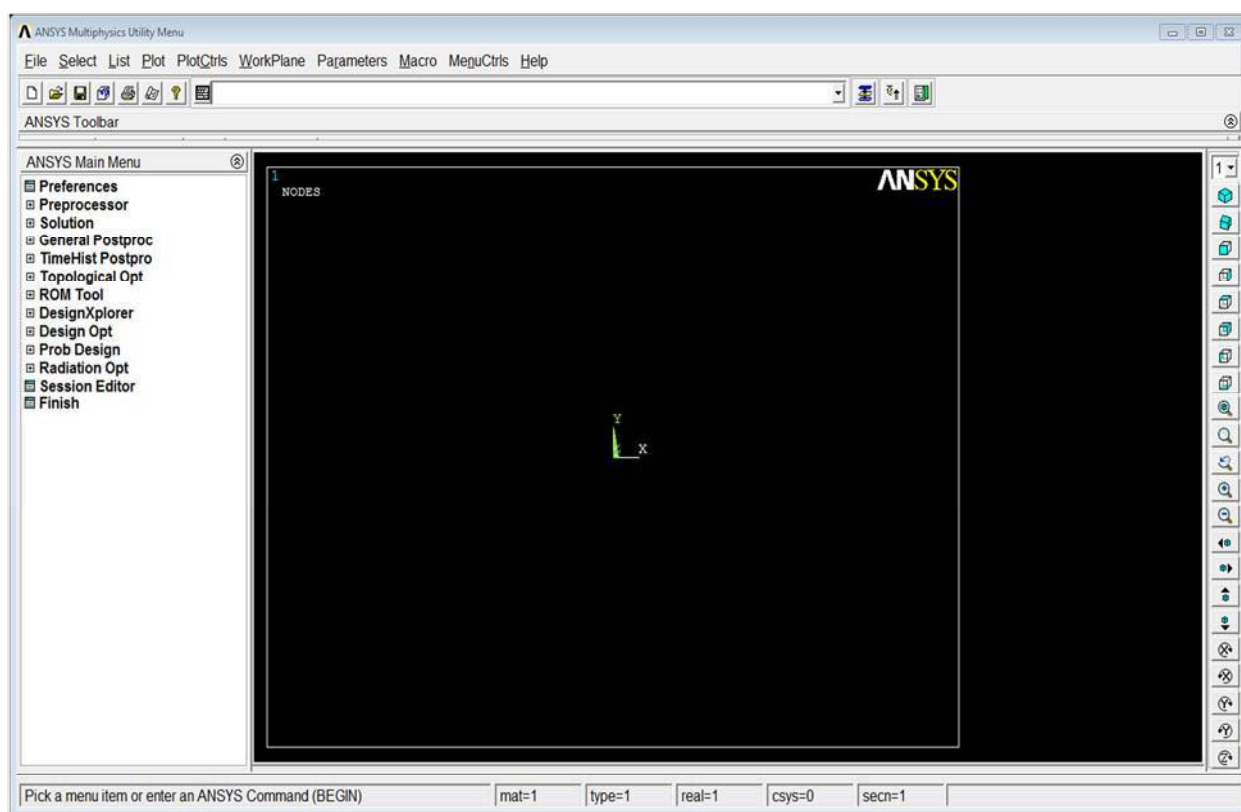
3 Vytvoření FEM modelu

3.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků vzešla z potřeby řešení komplexních úloh statické mechaniky ve stavebním a leteckém inženýrství. Její počátky lze nalézt v práci A. Hrennikoffova (1941) a R. Couranta (1942). Ačkoliv byly přístupy použité těmito průkopníky zásadně odlišné, mají jednu společnou charakteristiku: rozšiřování spojitě oblasti do množiny samostatných podoblastí. Hrennikoffova práce rozděluje oblast za pomoci mřížky, Courant dělí oblast do konečného počtu trojúhelníkových podoblastí pro řešení eliptických parciálních diferenciálních rovnic druhého stupně, které byly sestaveny z úlohy zabývající se krutem válce. Courantův evoluční přístup byl použitelný k výpočtu pro rozměrná tělesa již dříve získaných řešení těchto diferenciálních rovnic odvozených Rayleighem, Ritzem a Galerkinem. Vývoj metody konečných prvků započal na začátku 50. let 20. století při řešení konstrukce letadla a úloh statické mechaniky. Hnacím motorem bylo v 60. letech středisko v Berkeley zaměřené na úlohy stavebního inženýrství. Metoda byla propracována spolu s precizním matematickým aparátem v roce 1973 v publikaci Stranga a Fixe „Analysis of The Finite Element Method“ (Analýza metody konečných prvků), kdy již byla zobecněna do samostatného oboru aplikované matematiky pro numerické řešení fyzikálních soustav v celé řadě rozmanitých inženýrských disciplín, např. elektromagnetismus, dynamika tekutin. Rozvoj metody konečných prvků ve statické mechanice je často založen na energetickém principu, např. princip virtuálních prací nebo minimum celkové potenciální energie, kdy je k dispozici obecný intuitivní fyzikální základ se zásadním dopadem na stavební inženýrství.

Z matematického hlediska je metoda konečných prvků (MKP) používána pro nalezení aproximovaného řešení parciálních diferenciálních rovnic (PDR) i integrálních rovnic, např. rovnice vedení tepla. Postup řešení je založen jednak na úplné eliminaci diferenciální rovnice (stacionární úlohy), nebo na jejím převedení na ekvivalentní obyčejnou diferenciální rovnici, jež je následně řešena standardními postupy, jako je např. metoda konečných diferencí a další. Při řešení parciálních diferenciálních rovnic je základním krokem sestavení rovnice, která aproximuje řešenou rovnici a která je numericky stabilní, což znamená, že chyby ve vstupních datech a pomocných výpočtech se neakumulují a nevedou tak k nesmyslným výsledkům. Existuje celá řada možných postupů, všechny s určitými výhodami i nevýhodami. Metoda konečných prvků je rozumnou volbou pro řešení parciálních diferenciálních rovnic ve složitých oblastech (jakými jsou např. automobily či potrubní rozvody) nebo v případě, kdy se požadovaná přesnost mění pro celou oblast řešení. Základní verze programu ANSYS zahrnuje celou známou šíři fyzikálních problémů popsatečných metodou konečných prvků, tj. strukturální analýzu (statika a dynamika), teplo, proudění, akustiku, nízko- a vysokofrekvenční elektromagnetismus, vše v jednom programovém prostředí. Umožňuje současně

řešit problémy takzvaných sdružených úloh, jako např.: strukturální/teplo, fluidní/strukturální, elektrostatický/strukturální. Jednotné grafické prostředí GUI provází práci uživatele od preprocessingu přes solvery, až po postprocessing, je logické, jasné a přehledné. GUI zahrnuje celou šíři výpočtů, včetně nelineárních modelů výpočtů, stejně jako modely materiálů, nebo tranzientní úlohy, nebo parametrické modely pro optimalizaci. Vzhled programu ANSYS je zobrazen na obr. č. 13 [5], [6], [14].



Obr. č. 13: Vzhled programu ANSYS

3.2 Základní kroky k FEM analýze obecně

a) Preprocessor: Příkazy preprocesoru slouží k vytváření geometrického i matematického modelu. To znamená k zadání geometrie, volbě typu elementů, zadávání materiálových vlastností a vytváření sítě konečných prvků. Funkce preprocesoru jsou zobrazeny na obr. č. 14.



Obr. č. 14: Funkce Preprocessor

b) Solution – Řešení: Slouží k volbě typu analýzy, nastavení podmínek řešení, zadávání okrajových a také počátečních podmínek, zdrojů (zátěžových kroků) a samozřejmě k řešení. Na obr. č. 15 jsou zobrazeny funkce tohoto prostředí.



Obr. č. 15: Funkce Solution

c) General Postproc: postprocesor slouží k prohlížení a vyhodnocování výsledků. Jeho nabídka je zobrazena na obr. č. 16.



Obr. č. 16: Funkce General Postproc

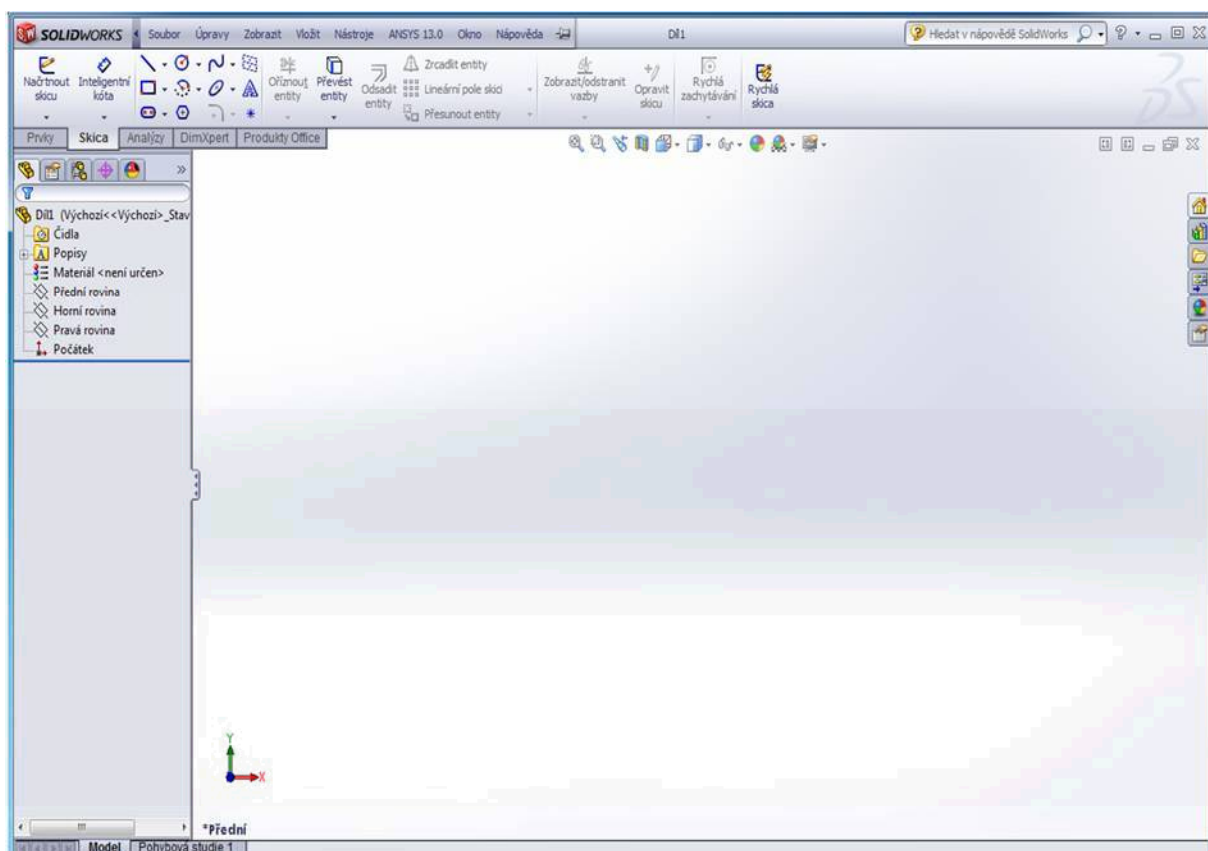
d) TimeHist Postpro: Slouží k prohlížení a vyhodnocování časově závislých dějů. Na obr. č. 17 jsou zobrazeny funkce TimeHist Postprocessoru.



Obr. č. 17: Funkce TimeHist Postpro

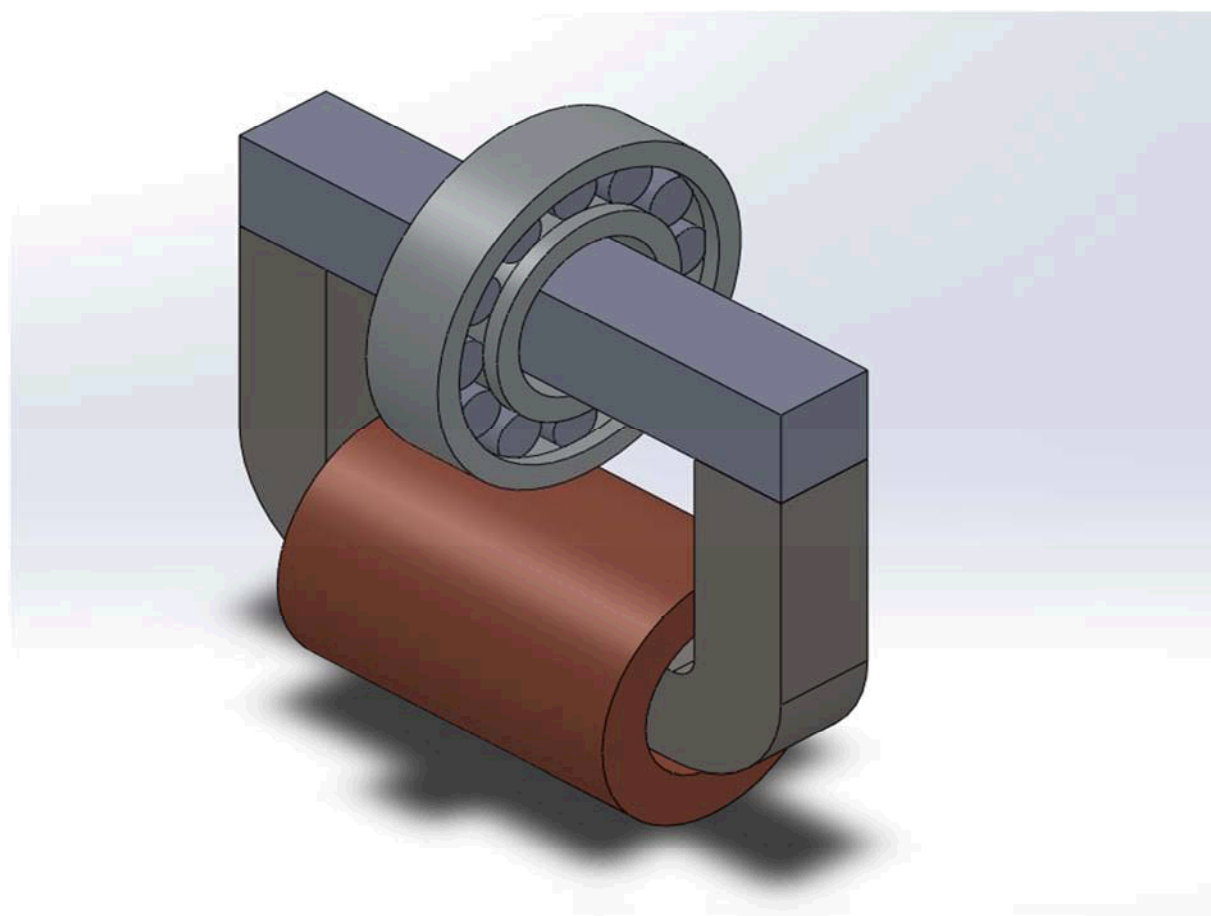
3.3 Vytvoření modelu indukčního přístroje

Jelikož program ANSYS neumožňuje vytvořit model požadovaných parametrů, musel jsem model vytvořit v profesionálním CAD. Pro účely své diplomové práce jsem si vybral program SolidWorks firmy Dassault Systèmes. Jde o 3D grafický program založený na platformě Parasolid. Práce v něm je přehledná a nabízí dobré ovládání s přehledem funkcí, které vedou tvůrce modelu krok za krokem, je tedy vhodný nejen pro profesionální modelování, ale i pro začátečníky. Program nabízí také možnost spolupráce s jinými typy souborů od konkurenčních firem. Rovněž například nabízí simulaci modelů a generování výkresové dokumentace. K základnímu programu lze připojit také různé doplňující balíčky (toolboxy). Existují různé verze programu SolidWorks, od školní verze až po verzi professional. Na obr. č. 18 je zobrazen náhled uživatelského prostředí programu SolidWorks. Model jsem musel upravit do souboru Parasolid x_t, který je vhodný pro import do programu ANSYS.



Obr. č. 18: Vzhled programu SolidWorks

Pro tvorbu geometrie jsem vycházel s katalogových údajů výrobců. Jako inspiraci jsem si vybral model SKF, přístroj typu TIH 220 m. Z důvodu nedostatku informací z katalogových listů jsem zvolil materiálové vlastnosti dle svého uvážení. Jako ložisko jsem si vybral válečkové ložisko typ NU 313 výrobce SKF. Vzhled celého modelu zařízení je znázorněn na obr. č. 19.

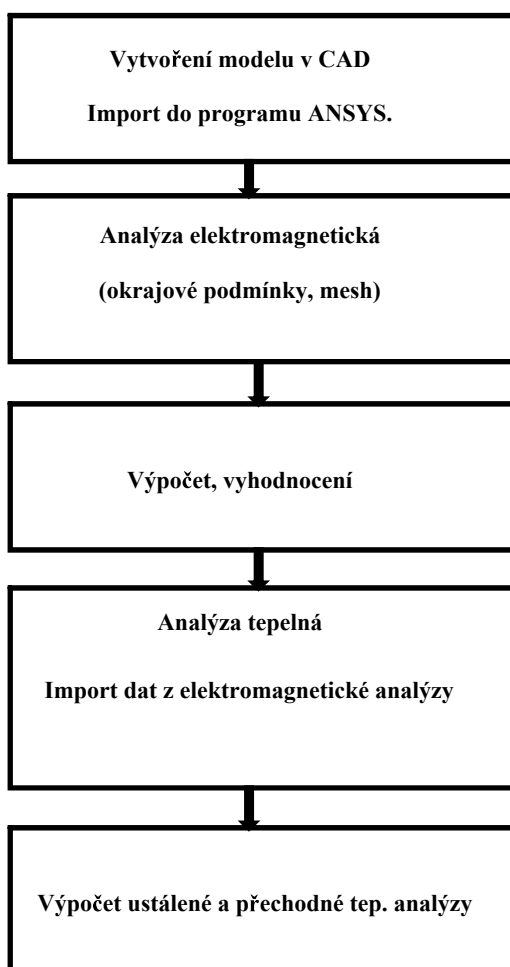


Obr. č. 19: Vzhled modelu indukčního přístroje s ložiskem

3.4 Cíl analýzy

Ve své práci analyzuji sdruženou úlohu, tj. úlohu elektromagnetickou a tepelnou. Problematiku bylo třeba rozdělit do dvou částí. V první části jsem modeloval indukční zařízení a jeho elektromagnetické pole, v druhé části jsem zjišťoval tepelné důsledky tohoto pole ložiska. Nejdříve jsem provedl analýzu elektromagnetickou a z těchto výsledných dat jsem získal vstupní informace pro analýzu tepelnou. Při

tepelné analýze jsem vycházel také z materiálových vlastností potřebných k výpočtu, dále jsem definoval součinitel přestupu tepla α , který činí $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a okolní teplotou 293 K. V každé části analýzy jsem musel definovat materiály, podmínky, prvky a provést síťování (mesh). Cílem mé diplomové práce bylo analyzovat indukční ohřev ložiska, přičemž jsem si zvolil dva typy úloh: v úloze č. 1 byla zvolena frekvence 50 Hz a jmenovité proudy 10 A, 15 A, 20 A; v úloze č. 2 byl zvolen konstantní proud 10 A a proměnná frekvence 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz. Na obr. č. 20 je zobrazen postup analýzy.

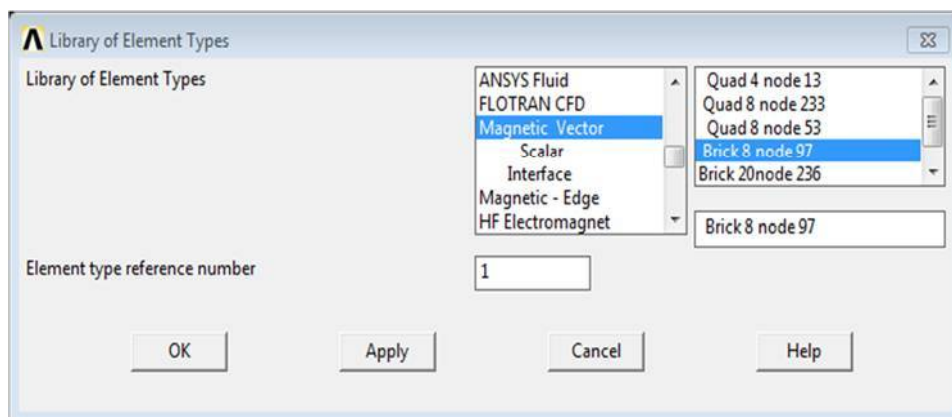


Obr. č. 20: Cíl řešení

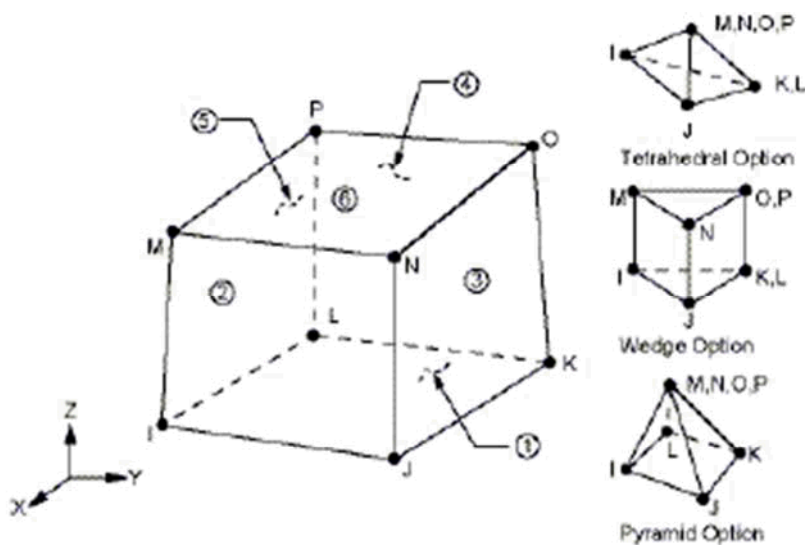
3.5 Analýza elektromagnetická

V programu ANSYS jsem si zvolil harmonickou analýzu elektromagnetického pole. Pro tuto analýzu je zapotřebí najít vhodný prvek. V knihovně ANSYSU jsem si zvolil prvek Brick 8 node 97, znázorněný na obr. č. 21 – tento prvek se značí jako SOLID 97. Je vhodný pro 3D modelování

magnetických nízkofrekvenčních polí. Prvek má 8 uzlů s 5 stupni volnosti v každém uzlu, s 6 definovanými DOFs, jde o magnetický vektorový potenciál (AX, AY, AZ), časově integrovatelný elektrický potenciál (klasická formulace nebo cívková formulace, elektrický proud a elektrická síla). Na obr. č. 22 je zobrazena geometrie elementu SOLID 97.



Obr. č. 21: Výběr prvku

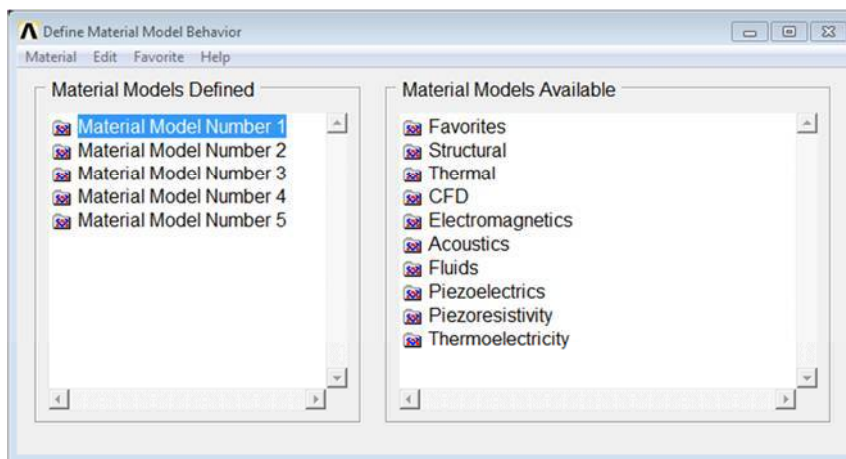


Obr. č. 22: Geometrie Solid 97

3.5.1 Volba materiálů

Pro specifikování jednotlivých částí modelu je třeba nadefinovat materiálové vlastnosti indukčního přístroje, ohřivaného tělesa a okolního vzduchu. Podle pořadí nabídky v programu ANSYS jsem zadal

konkrétní hodnoty materiálu. Na obr. č. 23 je menu nabídky v programu ANSYS pro zadání fyzikálních vlastností materiálu.

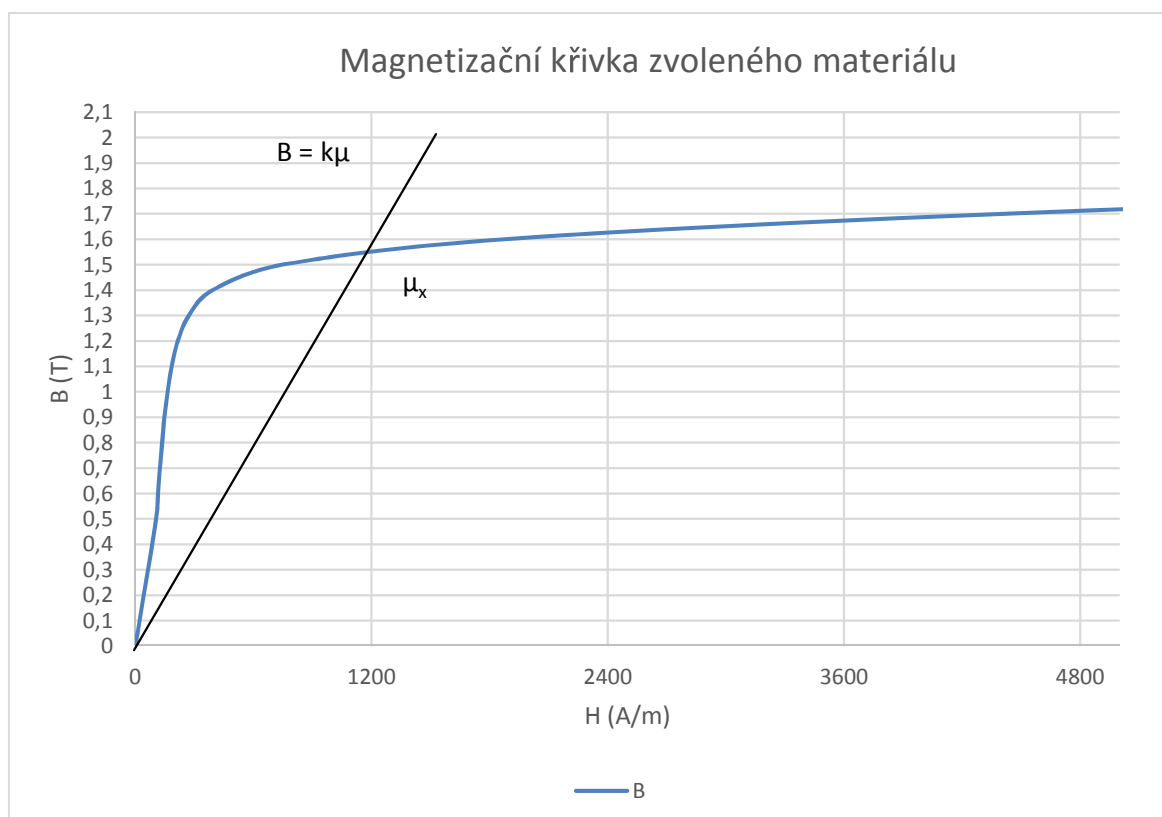


Obr. č. 23: Definování materiálů

Pro svůj numerický FEM model jsem částečně vycházel z katalogových údajů výrobců. Magnetický obvod jsem zvolil z kvalitních Fe-Si plechů typu M 530-50. Permeabilita má schopnost zmagnetizovat a zesílit magnetickou indukci B . V počátku je charakteristika B/H lineární přibližně do 1 T, poté dochází k zakřivení charakteristiky a dále se nezvětšuje B magnetická indukce, ale nastává nasycení magnetického materiálu. K určení permeability ložiska jsem si zvolil velikost dle svého zvážení, v katalogových listech nebyla tato informace zveřejněna, zvolil jsem si $\mu_r = 200$, u permeability magnetického obvodu a tyče jsem vycházel z charakteristiky přiložených mag. křivek materiálů z katalogu (znázorněno na obr. č. 24), vybral jsem si typ $0^\circ/90^\circ$, kde jsem si zvolil:

$$\mu_x = \frac{B_x}{H_x} = \frac{1,55}{1200 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = \frac{1,55 \cdot 10^7}{1200 \cdot 4 \cdot \pi} \approx 1028 \quad (52)$$

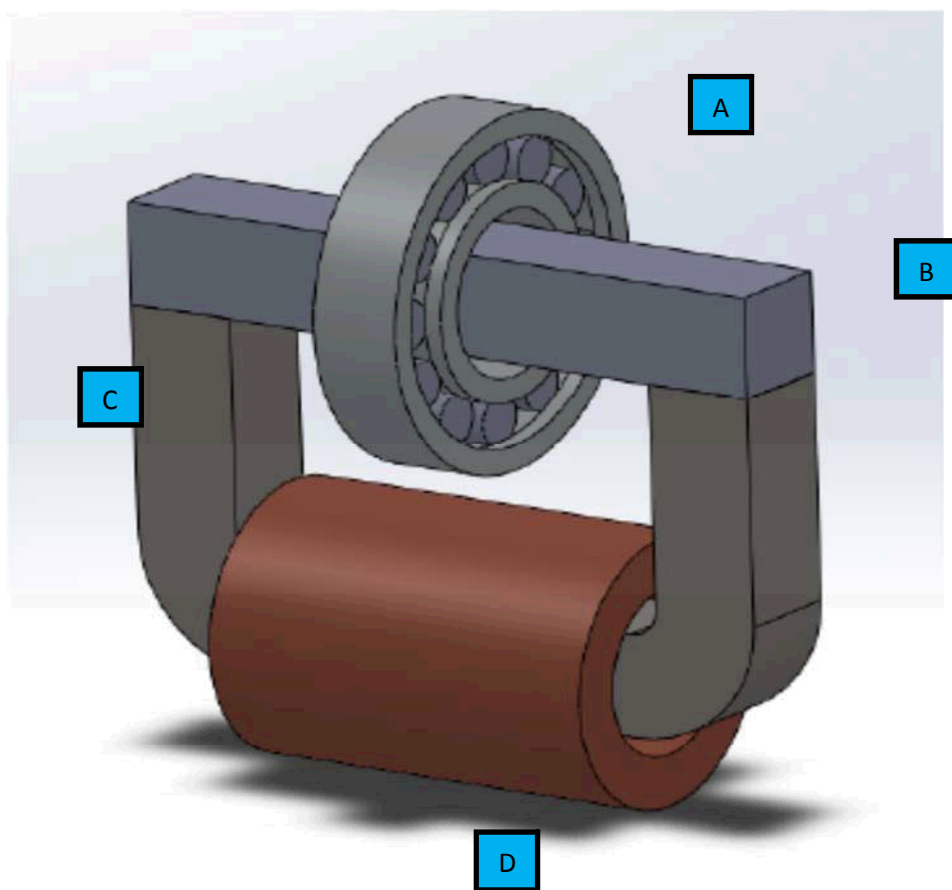
Při výběru materiálu pro ložisko jsem vycházel z údajů z katalogu normy ČSN 14 109: chromová ocel pro ložiska, cívka je vyrobena z měděného vodiče s parametry $N = 400$ závitů, $S = 0,003 \text{ (m}^2\text{)}$. Pro cívku jsem zadal proudovou hustotu, která je definována v programu ANSYS jako $J = \frac{N \cdot I}{S}$, z tohoto důvodu jsem nezadal rezistivitu mědi. Fyzikální vlastnosti jsou zobrazeny v tabulce č. 3. Indukční přístroj se skládá z několika částí mag. obvodu, tyče, cívky, ložiska a okolního prostředí. Na obr. č. 25 je znázorněn model indukčního přístroje s ložiskem a s popisem jednotlivých částí [15].



Obr. č. 24: Magnetizační křivka zvoleného materiálu

Tab. č. 3: Zvolené fyzikální vlastnosti

Díl	Permeabilita μ_r	Měr. odpor ($\Omega \cdot m$)
Ložisko	200	$256 \cdot 10^{-9}$
Mag. obvod	1028	-
Tyč	1028	-
Cívka	1	-
Vzduch	1	-



Obr. č. 25: Podoba vytvořeného modelu

A - Ložisko

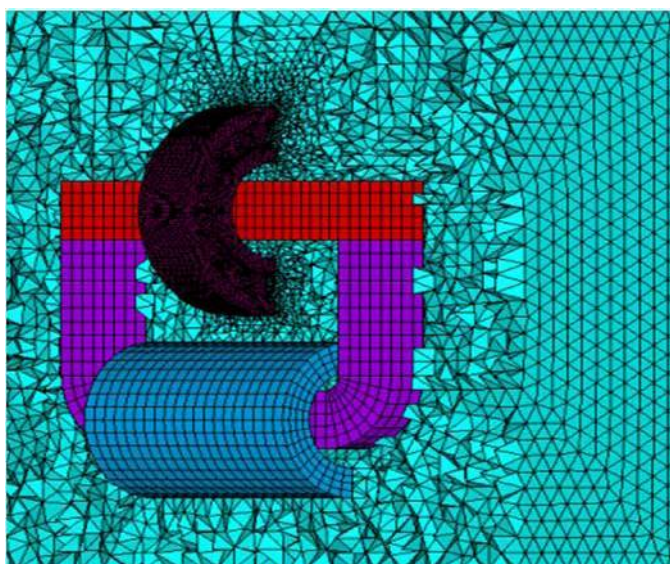
B - Tyč

C - Mag. obvod

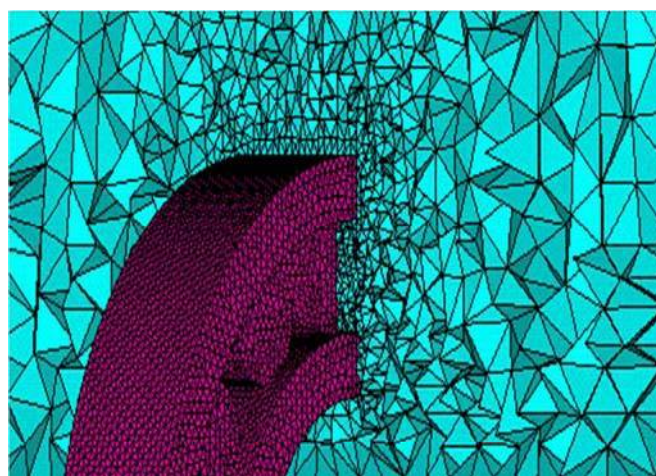
D - Cívka

3.6 Tvorba sítě

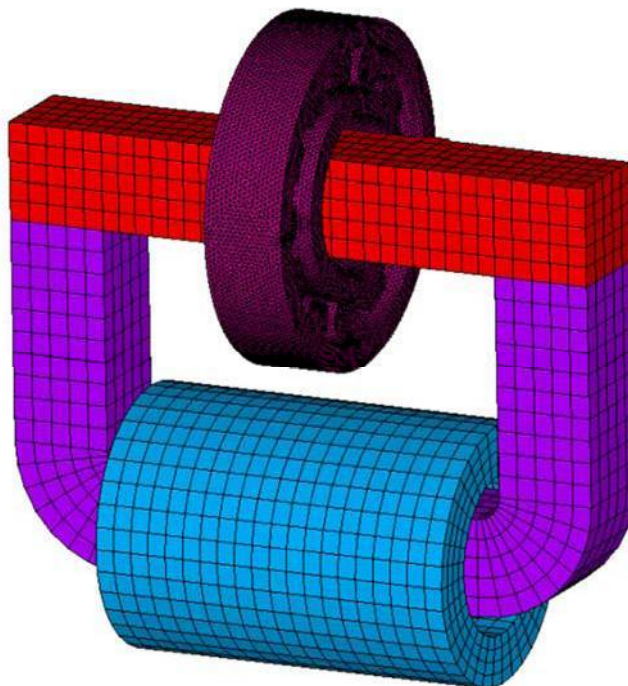
Dalším krokem k vytvoření analýzy je síťování. Důležitá je velikost elementu, neboť na ní závisí výsledek a doba výpočtu. Čas se zvětšuje s počtem elementů, naopak menší počet elementů způsobí nekorektnost výsledku analýzy. Z důvodu korektnosti výsledku jsem vzduch a ložisko vysítával jemněji – u tohoto síťování byla síť realizovaná nastavením elementu o velikosti 0,0125 m. Ostatní díly mag. obvodu – tyč a cívk – jsem síťoval hruběji z důvodu menší výpočetní náročnosti. Na obr. č. 26 je zobrazeno síťování indukčního přístroje s ložiskem a okolním prostředím (vzduchem). Na obr. č. 27 je na řezu výpočetní síť viditelně jemné síťování vzduchu kolem ložiska, což by mělo být předpokladem korektního výsledku analýzy. Na obr. č. 28 je zobrazen síťovaný simulovaný model.



Obr. č. 26: Výpočetní síť simulovaného zařízení v řezu



Obr. č. 27: Detail výpočetní sítě okolí ložiska v řezu



Obr. č. 28: Síťovaný simulovaný model

3.6.1 Statistika elementů

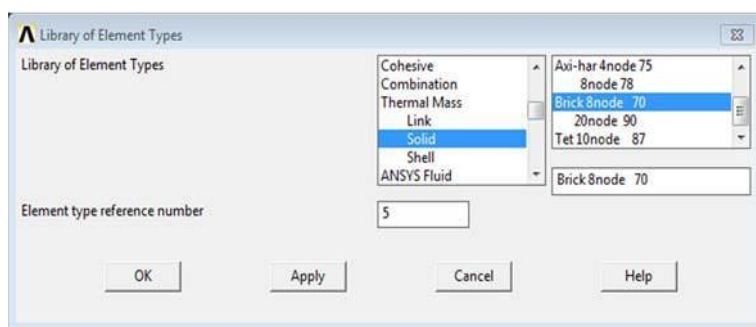
Počet elementů v této úloze je zobrazen v tabulce č. 4 dle statistických údajů v programu ANSYS. Jedná se o časově a výpočetně složitou úlohu.

Tabulka č. 4: Statistika elementů

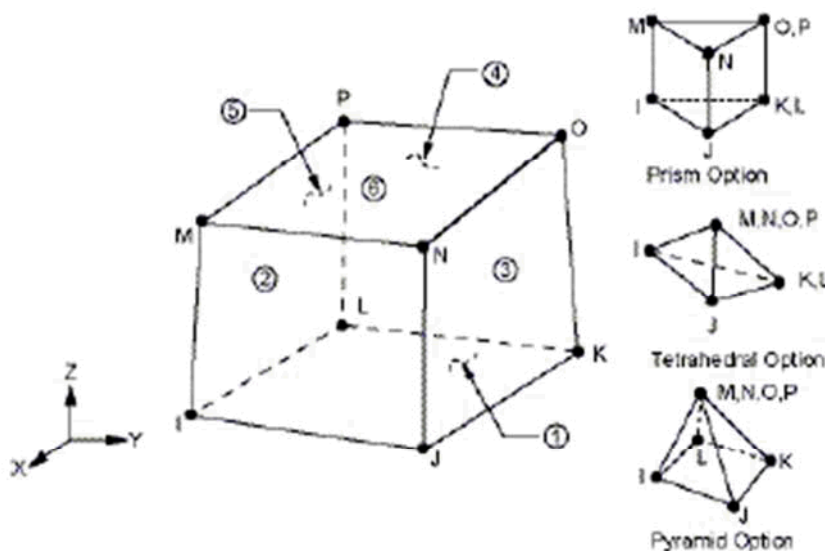
Druh materiálu	Počet elementů
Vzduch	630 072
Mag. obvod	1 400
Tyč	850
Cívka	2 880
Ložisko	263 731

3.7 Analýza tepelná

V druhé části práce jsem provedl tepelnou analýzu ohřívaného tělesa, tedy ložiska. V tepelné analýze jsem vyhodnotil ustálenou a přechodnou analýzu. Ustálená tepelná analýza počítá účinky rovnoměrné tepelné zátěže na celý systém nebo na jeho součást. Může být použita pro určení teploty, teplotního gradientu a teplotního toku způsobeného tepelnou zátěží, kterou nelze měnit v čase. Ustálená teplotní analýza je také často prováděna před teplotní přechodovou analýzou, aby pomohla určit počáteční podmínky, nebo může být také posledním krokem teplotní přechodové analýzy poté, co všechny přechodové jevy skončily. Teplotní přechodová analýza se používá pro určení teploty a tepelného množství měnícího se v čase. Pro tuto analýzu jsem si vybral z knihovny ANSYSU prvek Brick 8node 70, viz obr. č. 29. Tento prvek je vhodný pro 3D modelování, skládá se z 8 uzlů a jednoho stupně volnosti. Je vhodný pro statickou analýzu a přechodnou časovou analýzu. Na obr. č. 30 je zobrazena geometrie prvku SOLID 70.



Obr. č. 29: Volba prvku



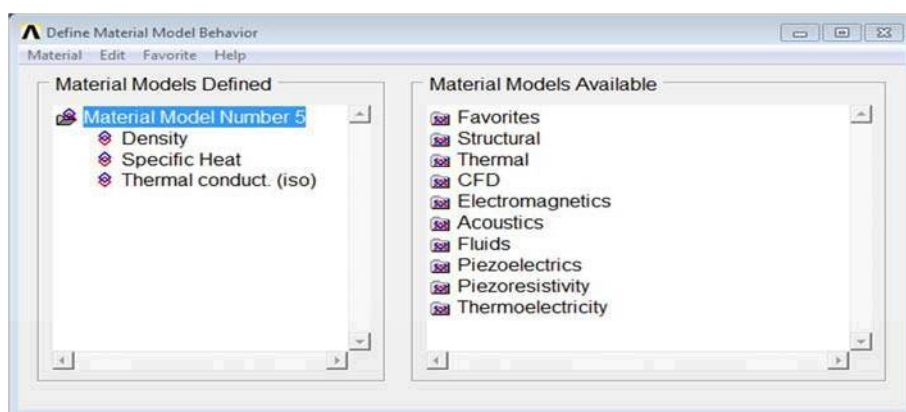
Obr. č. 30: Geometrie SOLID 70

3.7.1 Volba materiálů

Pro danou úlohu se také musí zvolit fyzikální vlastnosti. V programu ANSYS – menu pro definování materiálu viz obr. 31 – jsem zadal tyto veličiny:

- hustotu $7800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
- měrnou tepelnou kapacitu $480 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- tepelnou vodivost $37,6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Dále jsem nastavil součinitel přestupu tepla α , který činí $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pro ložisko, k přesné hodnotě bych musel provést experiment – závisí totiž na mnoha faktorech: tlaku, teplotě, na druhu proudění, drsnosti povrchu a rozměrech tělesa. Dále jsem v tepelné analýze definoval okolní teplotu prostředí, která činila 293 K.



Obr. č. 31: Volba materiálových vlastností v tepelné analýze

4 Vyhodnocení FEM analýzy

V této kapitole jsem vyhodnotil elektromagnetickou a tepelnou analýzu. V elektromagnetické úloze zjišťuji velikost magnetické indukce a intenzitu magnetického pole. V tepelné analýze zjišťuji velikost rozložení teploty v ložisku a rychlost ohřevu – vytvořil jsem oteplovací charakteristiky. Dále jsem pracoval se dvěma typy úloh. V 1. úloze jsem analyzoval zatížení při různých velikostech proudů při frekvenci 50 Hz. V úloze č. 2 zjišťuji účinky zvýšení frekvence při proudu $I = 10$. Zjišťoval jsem rychlost ohřevu v závislosti na zvýšení budicího proudu a zvýšení frekvence.

Zadání úloh:

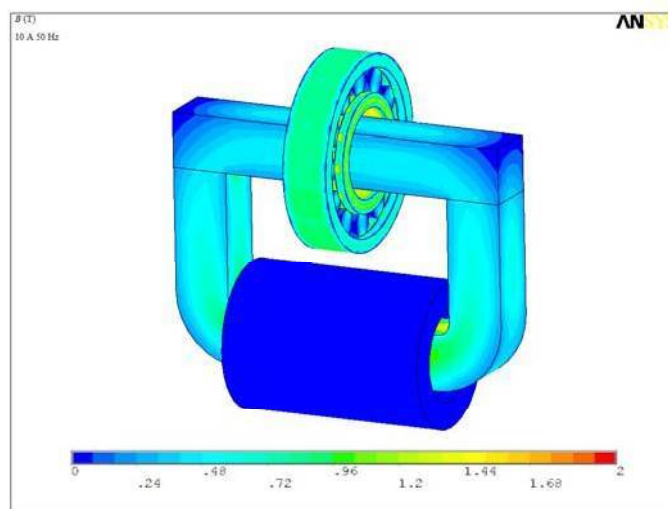
Úloha č. 1: Frekvence 50 Hz, $I = 10$ A, $I = 15$ A, $I = 20$ A

Úloha č. 2: Proud 10 A, $f = 50$ Hz, $f = 100$ Hz, $f = 150$ Hz

4.1 Vyhodnocení elektromagnetické analýzy úlohy č. 1

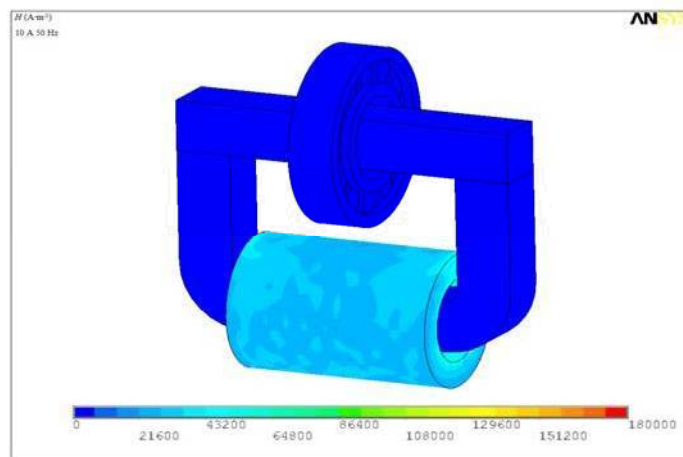
4.1.1 Vyhodnocení 50 Hz 10 A

Výsledná analýza magnetické indukce sledovaného indukčního přístroje je znázorněna na obr. č. 32. V magnetickém obvodu a tyči je magnetická indukce až do velikosti 1,2 T, lokálně mag. indukce dosahuje pod cívkou maximální hodnoty až 1,44 T. V ložisku magnetická indukce dosáhne až 1,44 T (v určitých místech ložiska).



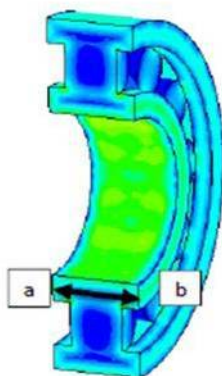
Obr. č. 32: Vyhodnocení magnetické indukce 50 Hz 10 A

Na obr. č. 33 je zobrazena intenzita magnetického pole H . V cívice lokálně dosahuje maximální hodnoty až $50\,400\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$. V magnetickém obvodu a v ložisku dosahuje intenzita mag. pole $7\,200\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$.

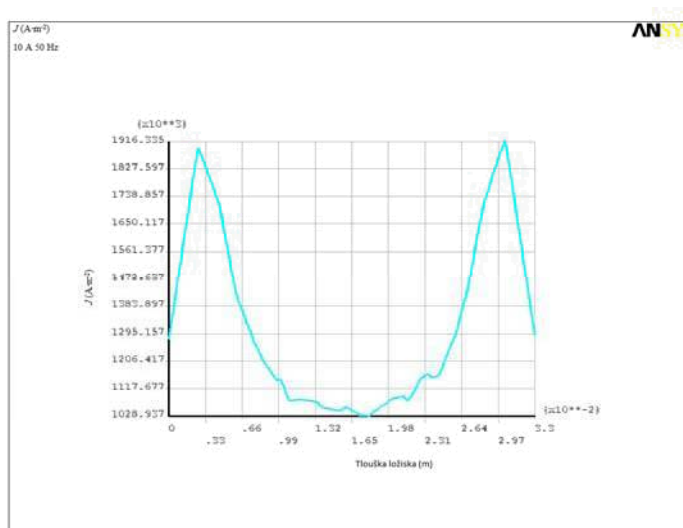


Obr. č. 33: Vyhodnocení intenzity mag. pole 50 Hz 10 A

Jako další veličinu jsem vyhodnotil proudovou hustotu (graf J). Jelikož program ANSYS nedisponoval v knihovně grafem proudové hustoty J , musel jsem si vyhodnocení grafu J definovat. V programu jsem postupoval takto: dle přiloženého obr. č. 34 jsem vytvořil dráhu mezi příslušnými body a–b. Vysledný průběh proudové hustoty je znázorněn na obr. č. 35 – proudová hustota dosahuje až $1\,916\text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$.



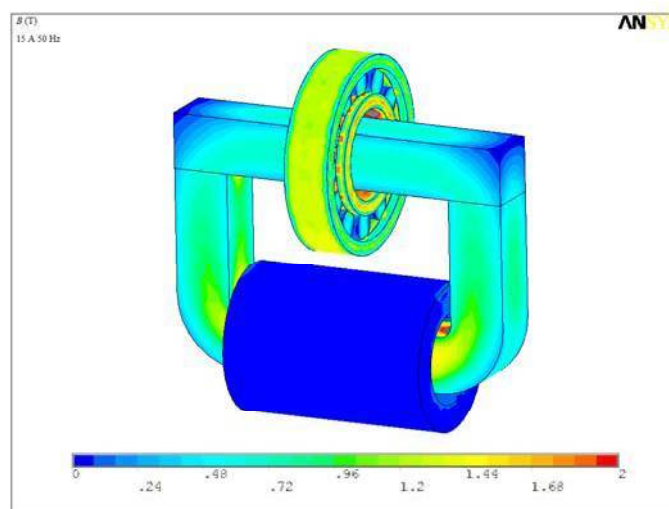
Obr. 34: Definice dráhy a–b proudové hustoty



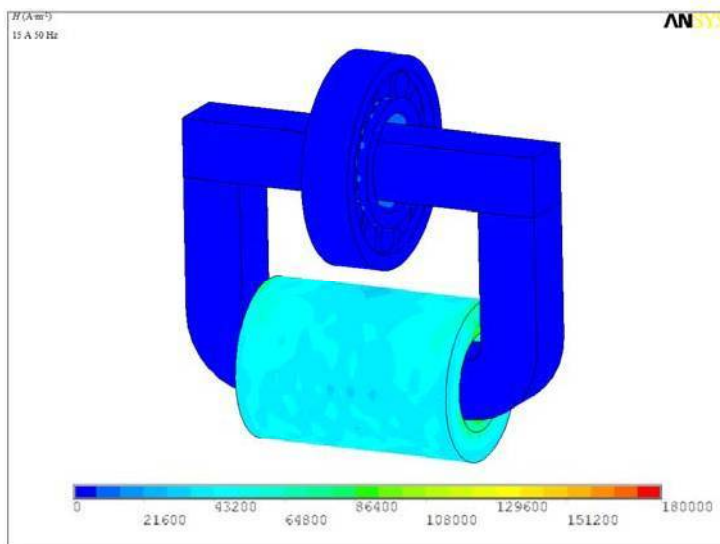
Obr. č. 35: Vyhodnocení proudové hustoty 50 Hz 10 A

4.1.2 Vyhodnocení 50 Hz 15 A

Výsledná hodnota magnetické indukce je znázorněna na obr. č. 36. V magnetickém obvodu a tyči dosahuje magnetická indukce až 1,44 T. V ložisku magnetická indukce dosahuje až 2 T (v lokálních místech ložiska). Intenzita magnetického pole dosahuje v magnetickém obvodu a tyči 7 200 A·m⁻¹. V cívice dosahuje při této simulaci nastavení až 50 400 A·m⁻¹, lokálně až 93 600 A·m⁻¹. Intenzita magnetického pole je znázorněna na obr. č. 37.

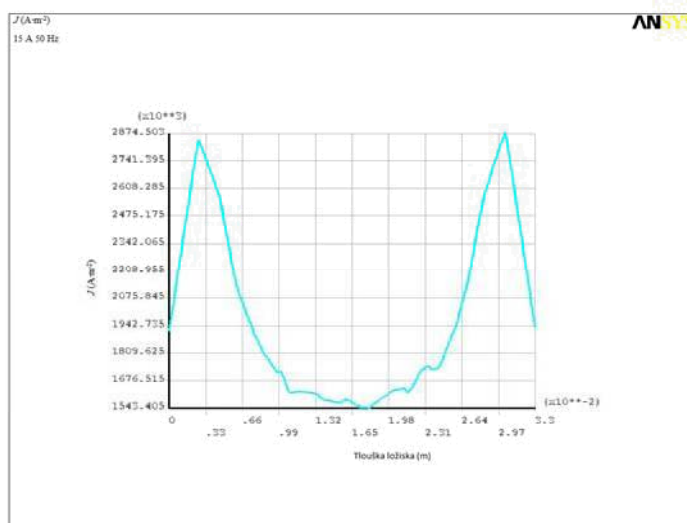


Obr. č. 36: Vyhodnocení mag. indukce 50 Hz 15 A



Obr. č. 37: Vyhodnocení intenzity mag. pole 50 Hz 15 A

Výsledný průběh proudové hustoty J je znázorněn na obr. č. 38, proudová hustota dosahuje až $2\,874\text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$.

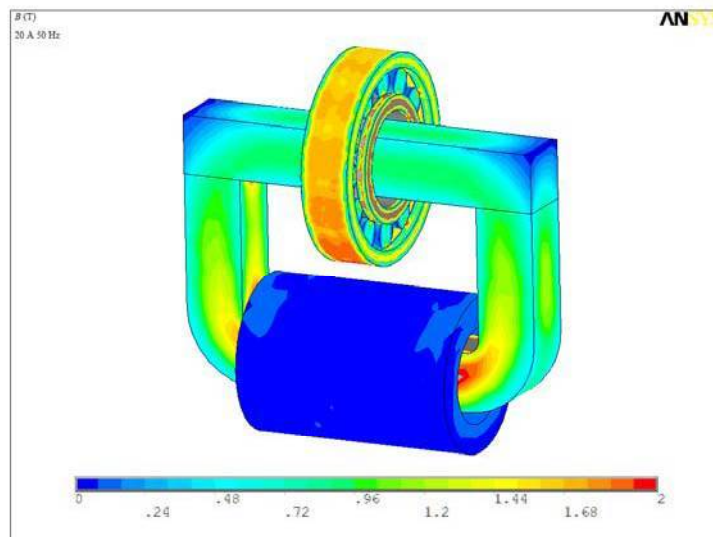


Obr. č. 38: Vyhodnocení proudové hustoty 50 Hz 15 A

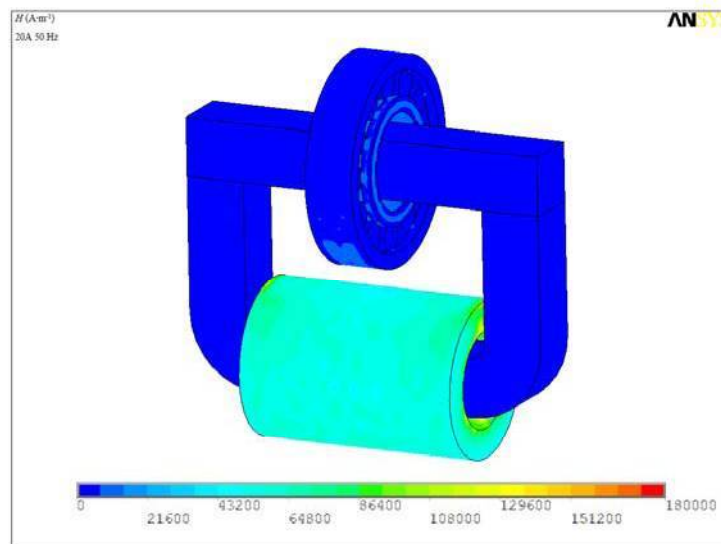
4.1.3 Vyhodnocení 50 Hz 20 A

Výsledná hodnota magnetické indukce je znázorněna na obr. č. 39. V magnetickém obvodu a tyči dosahuje magnetická indukce až 1,44 T, lokálně dosahuje až 2 T. V ložisku magnetická indukce dosahuje až 2 T (v lokálních místech ložiska). Intenzita magnetického pole dosahuje v magnetickém obvodu a tyči $7\,200\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$, v některých místech ložiska dosahuje až $28\,800\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$. V cívice dosahuje

při této simulaci nastavení až $50\,400\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$, lokálně dosáhne až $129\,600\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$. Intenzita mag. pole je zobrazena na obr. č. 40.

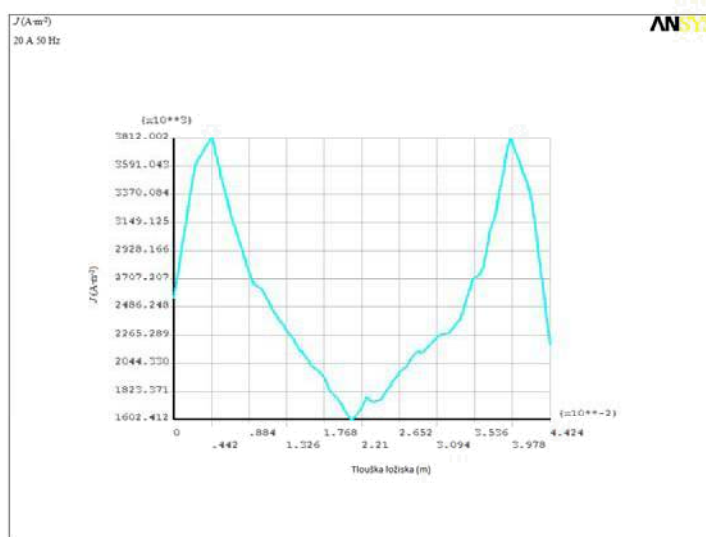


Obr. č. 39: Vyhodnocení mag. indukce 50 Hz 20 A



Obr. č. 40: Vyhodnocení intenzity mag. pole 50 Hz 20 A

Výsledný průběh proudové hustoty je znázorněn na obr. č. 41, proudová hustota dosahuje až $3\,812\text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$.



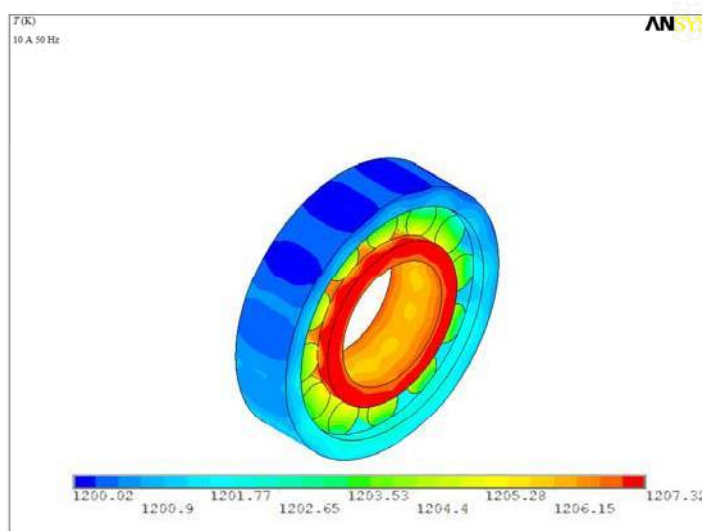
Obr. č. 41: Vyhodnocení proudové hustoty 50 Hz 20 A

4.2 Vyhodnocení tepelné analýzy úlohy č. 1

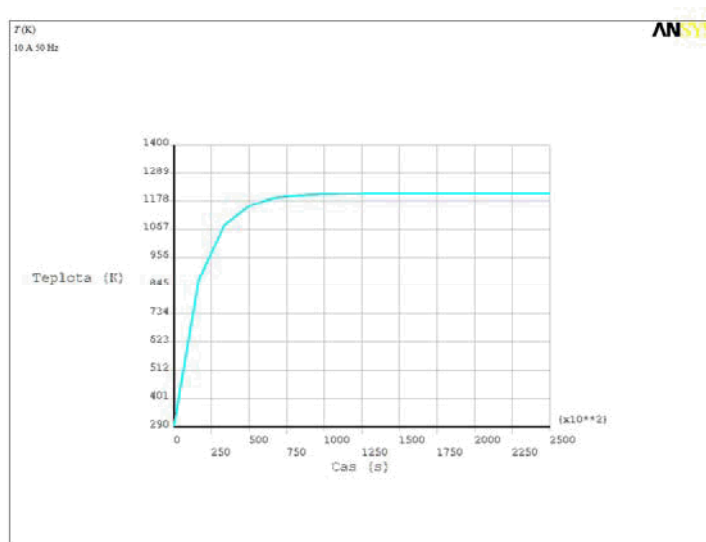
V této části analýzy jsem vyhodnotil tepelnou analýzu ložiska. Ustálená analýza vyjadřuje nepřetržitý přísun tepla do tělesa. Přechodná analýza je závislá na čase. Tato rovnice vyjadřuje přísun tepla do tělesa:

$$Pdt = Cd(\Delta\theta) + \alpha S \Delta\theta dt \quad (53)$$

Na ukázkou jsem zobrazil oteplovací charakteristiku ustálené teploty zadání $f = 50$ Hz, $I = 10$ A, viz obr. č. 42, a znázornil oteplovací charakteristiku ložiska, viz obr. č. 43. V tepelné analýze budu zjišťovat pouze přechodnou analýzu a oteplovací charakteristiku.



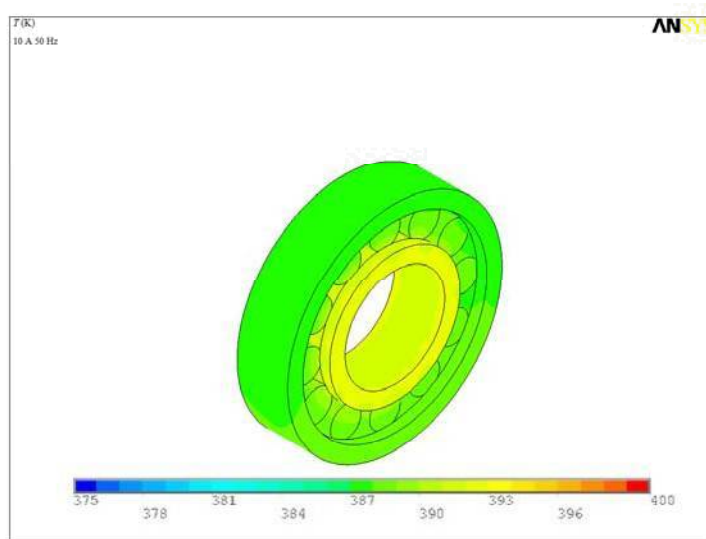
Obr. č. 42: Vyhodnocení teploty 50 Hz 10 A



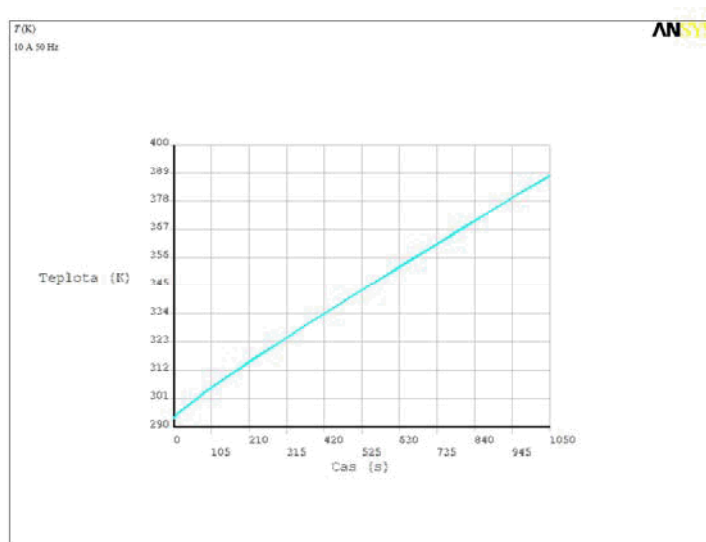
Obr. č. 43: Vyhodnocení oteplovací charakteristiky 50 Hz 10 A

4.2.1 Vyhodnocení 50 Hz 10 A

Na obr. č. 44 je vyhodnoceno ložisko v tepelné přechodné analýze – je patrný rozdíl teploty vnějšího povrchu ložiska a vnitřního povrchu ložiska. Teplota dosahuje na vnějším povrchu ložiska 387 K, vnitřní povrch ložiska dosahuje 393 K, což je rozdíl 6 K. Vytvořená oteplovací charakteristika je zobrazena na obr. č. 45.



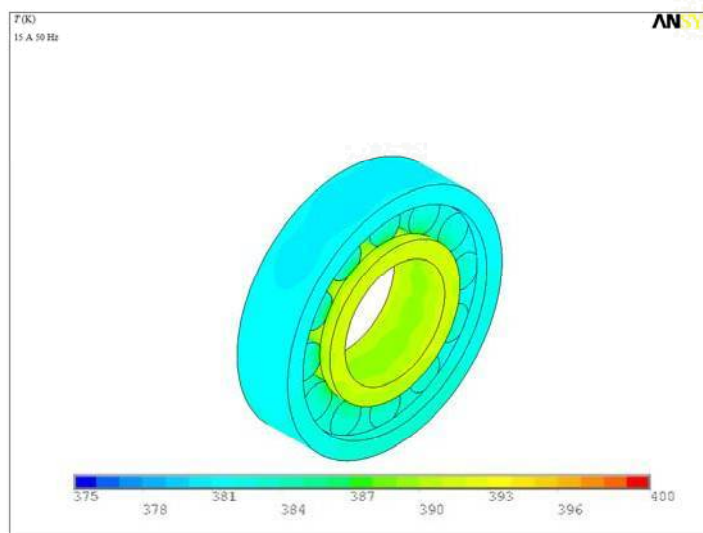
Obr. č. 44: Vyhodnocení teploty 50 Hz 10 A



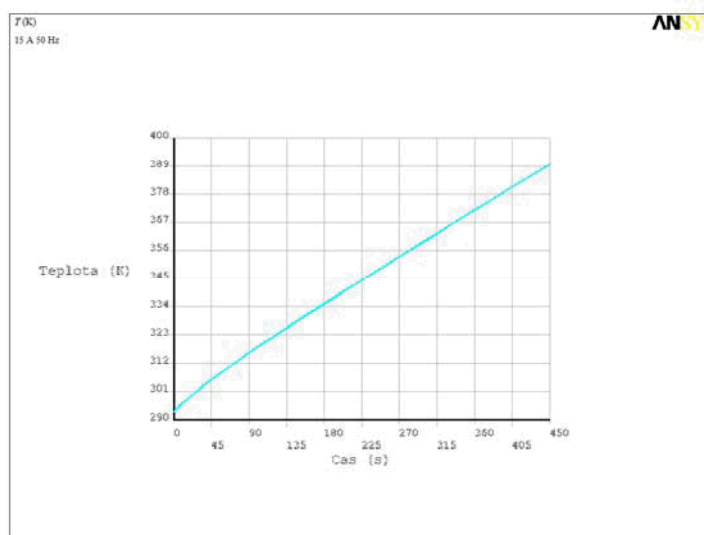
Obr. č. 45: Vyhodnocení oteplovací charakteristiky 50 Hz 10 A

4.2.2 Vyhodnocení 50 Hz 15 A

V této analýze teplota dosahuje na povrchu ložiska 381 K, uvnitř ložiska dosahuje až 393 K, což je rozdíl 12 K (viz obr. č. 46). Oteplovací charakteristika je zobrazena, viz obr. č. 47.



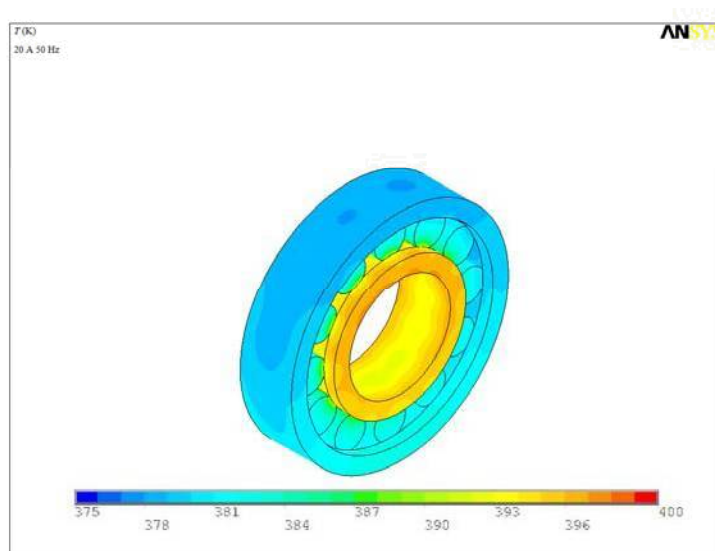
Obr. č. 46: Vyhodnocení teploty 50 Hz 15 A



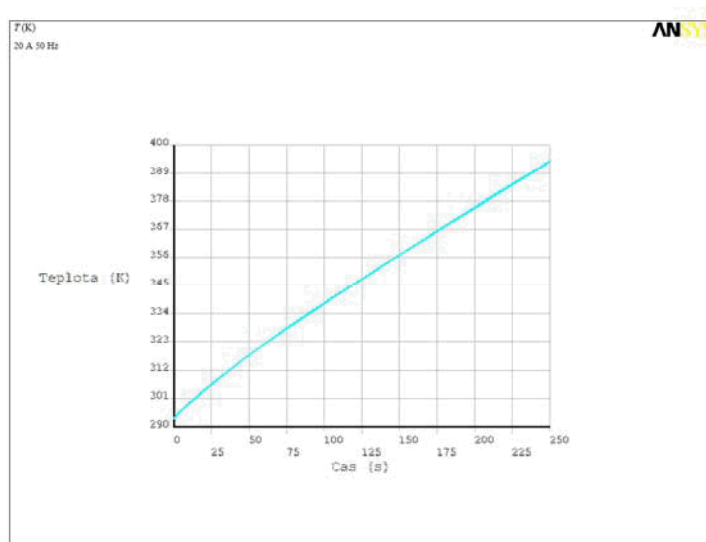
Obr. č. 47: Vyhodnocení oteplovací charakteristiky 50 Hz 15

4.2.3 Vyhodnocení 50 Hz 20 A

Teplota dosahuje na povrchu ložiska v horní části kolem 379 K, ve spodní části ložiska 381 K, vnitřní povrch ložiska dosahuje lokálně až 400 K, což je rozdíl až 21 K (viz obr. č. 48). Oteplovací charakteristika je zobrazena na obr. č. 49.

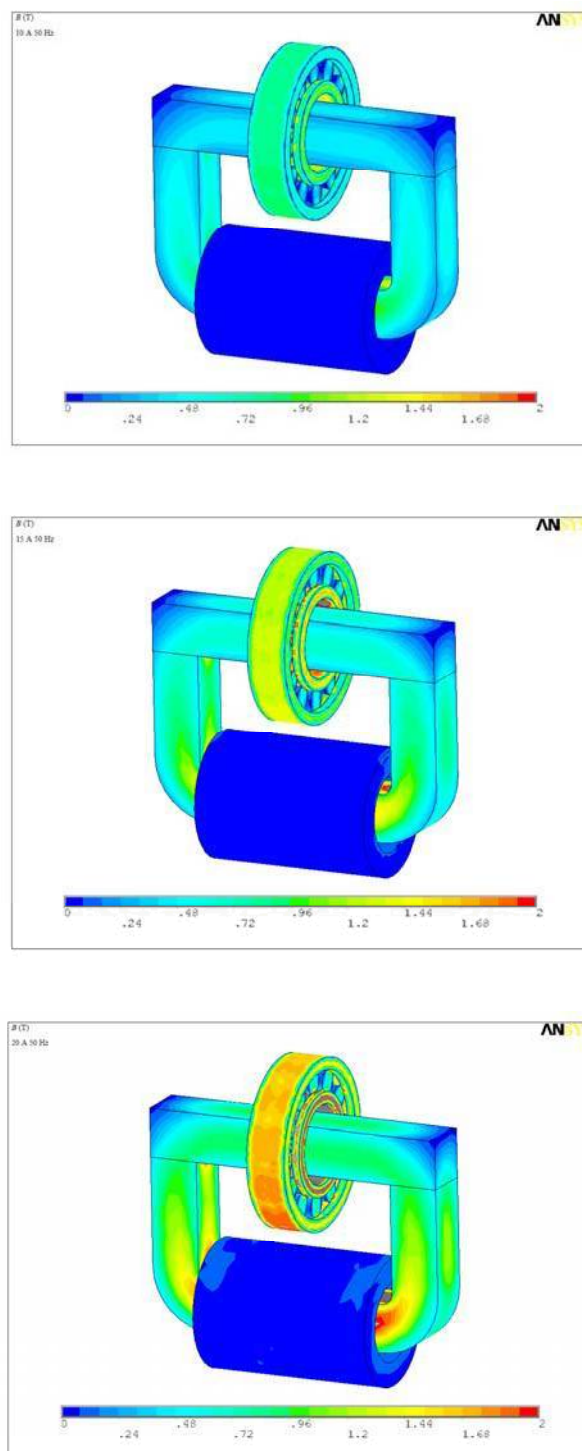


Obr. č. 48: Vyhodnocení teploty 50 Hz 20 A

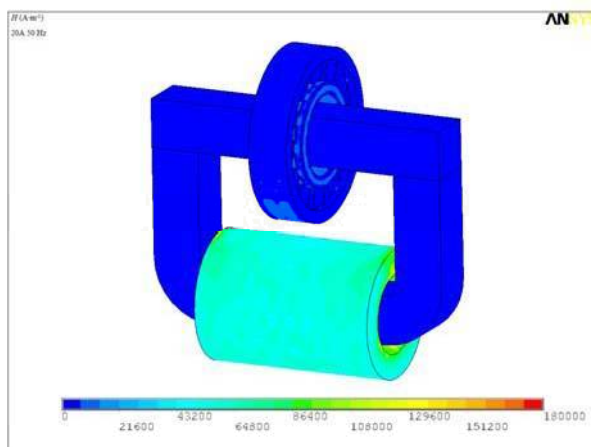
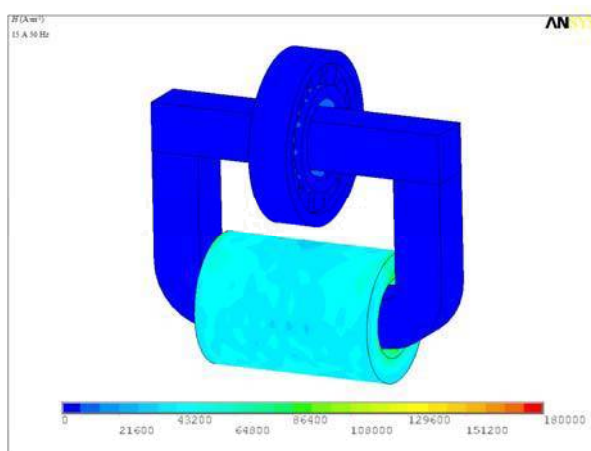
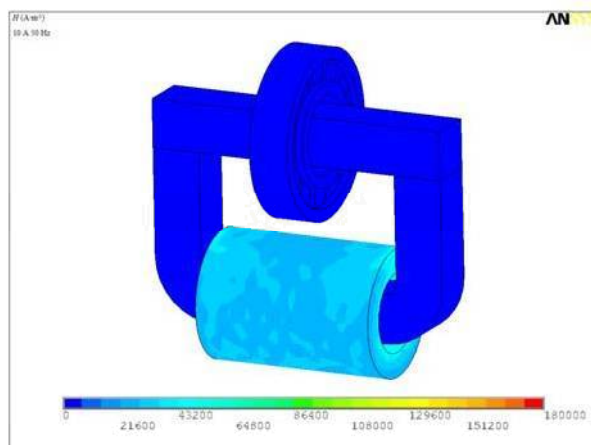


Obr. č. 49: Vyhodnocení oteplovací charakteristiky 50 Hz 20 A

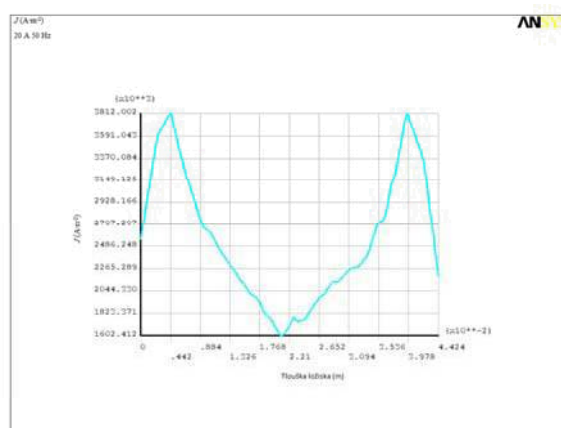
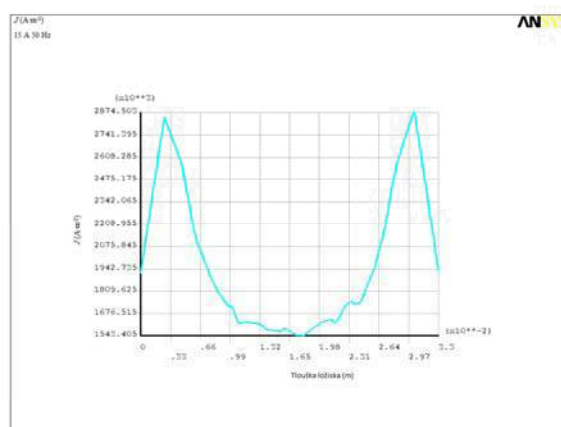
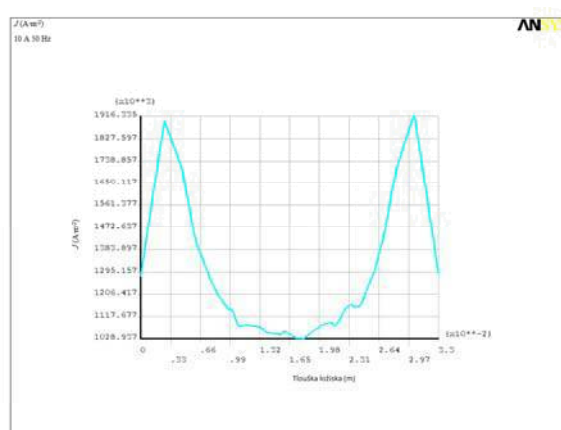
4.3 Srovnání elektromagnetické a tepelné analýzy úlohy č. 1



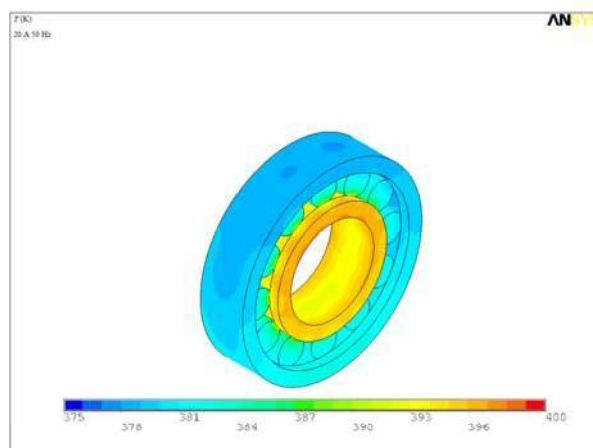
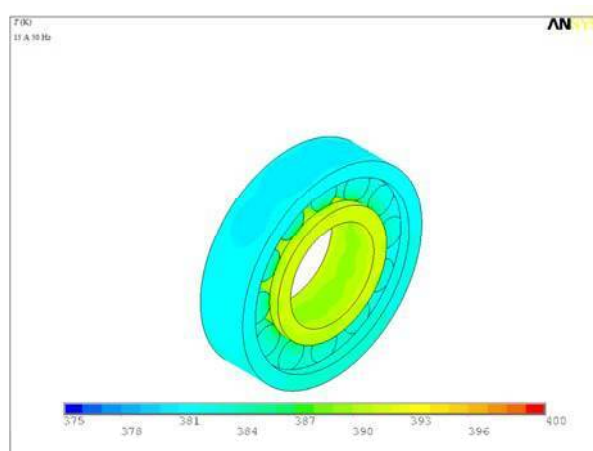
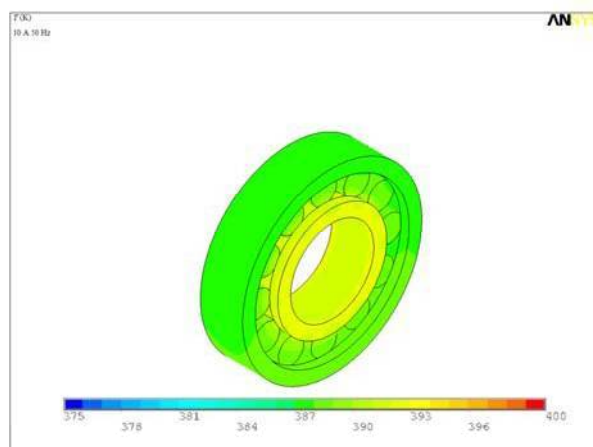
Obr. č. 50: Vyhodnocení magnetické indukce 50 Hz



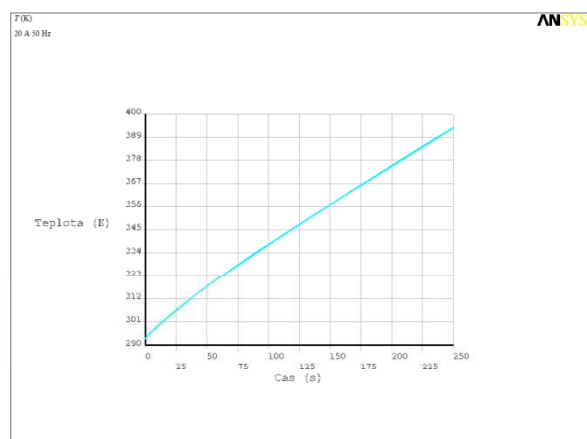
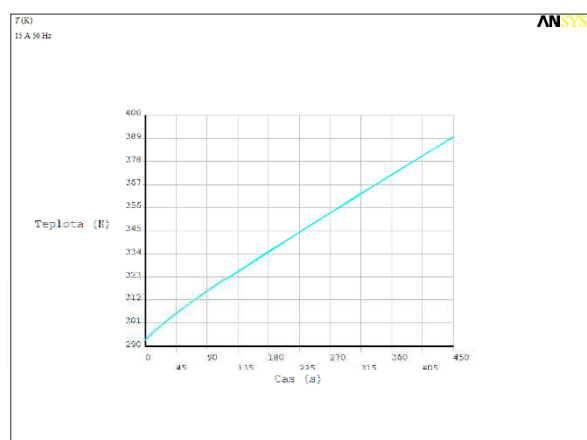
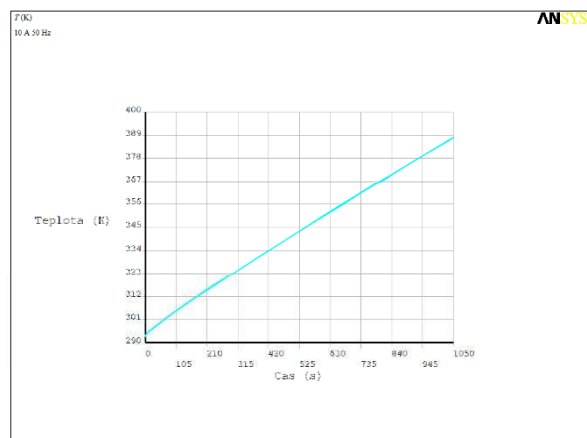
Obr. č. 51: Vyhodnocení intenzity mag. pole 50 Hz



Obr. č. 52: Vyhodnocení proudové hustoty 50 Hz



Obr. č. 53: Vyhodnocení teploty 50 Hz

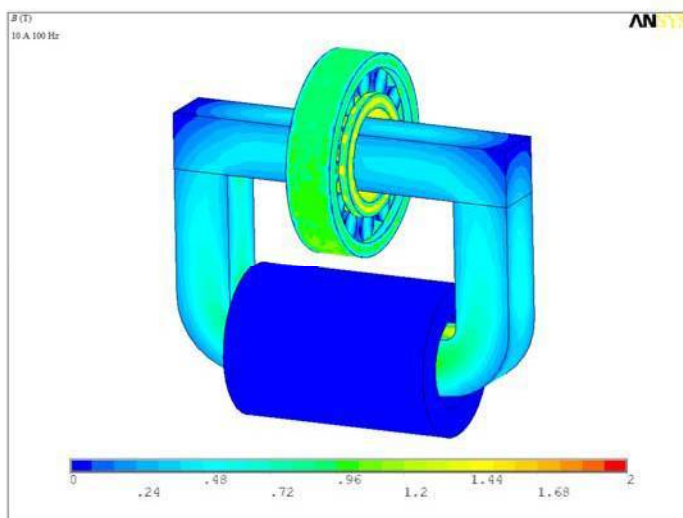


Obr. č. 54: Vyhodnocení ohřívací charakteristiky

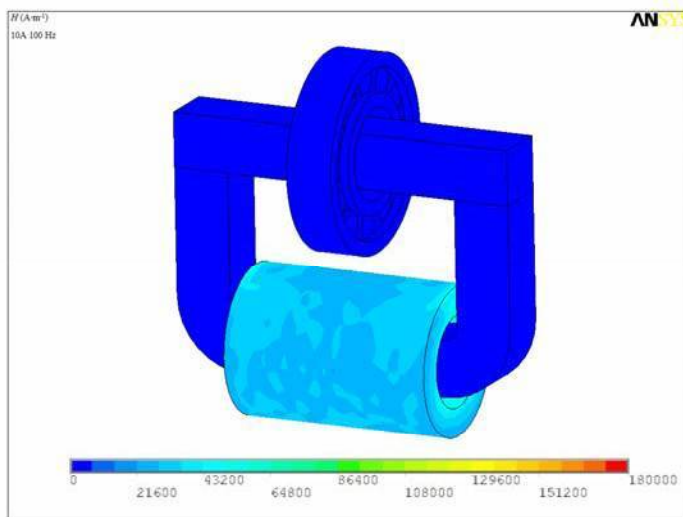
4.4 Vyhodnocení elektromagnetické analýzy úlohy č. 2

4.4.1 Vyhodnocení 10 A 100 Hz

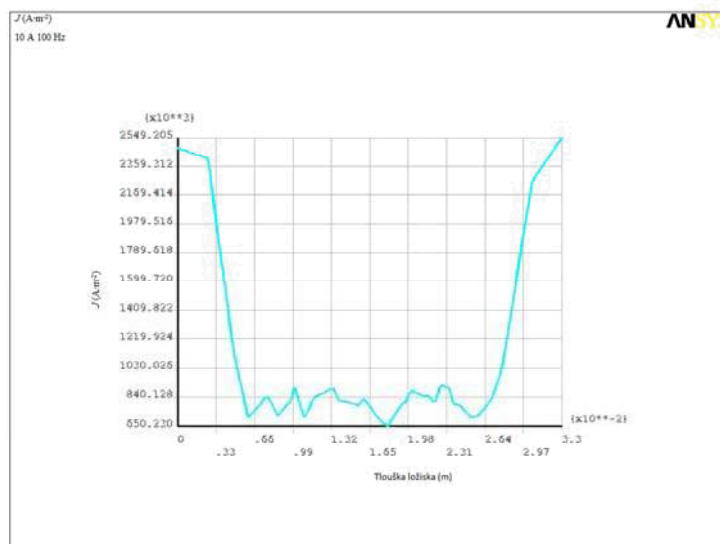
V této úloze analyzuji indukční ohřev ložiska při různých frekvencích. Vybral jsem si úlohu $I = 10$ A, $f = (50 \text{ Hz}, 100 \text{ Hz}, 150 \text{ Hz})$. Analýza 10 A 50 Hz byla vyhodnocena v kapitole 4.1.1. Zvolená analýza 10 A 100 Hz je zobrazena na obr. č. 55, kdy magnetická indukce dosahuje až 1,44 T. Intenzita magnetického pole ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$) dosahuje v cívce až 43 200 $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$. V ložisku, mag. obvodu a tyči dosahuje velikosti až 7 200 $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$. Analýza je zobrazena na obr. č. 56. Proudová hustota dosahuje hodnoty až 2 549 ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$), viz obr. č. 57.



Obr. č. 55: Vyhodnocení magnetické indukce 100 Hz 10 A



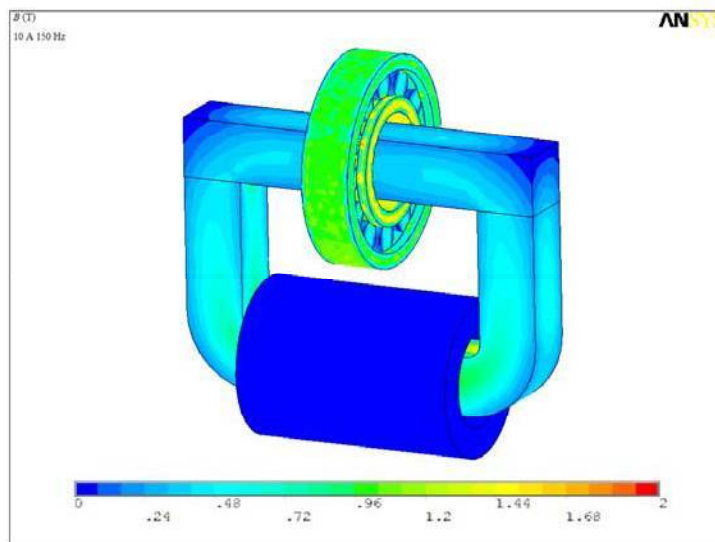
Obr. č. 56: Vyhodnocení intenzity mag. pole 100 Hz 10 A



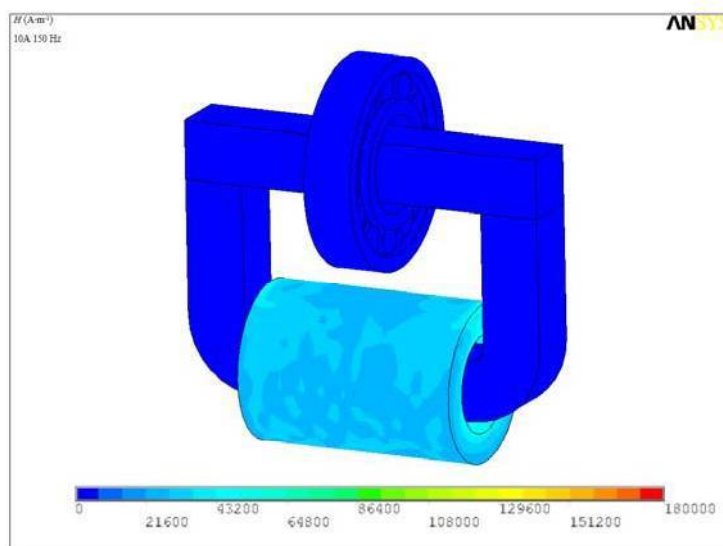
Obr. č. 57: Vyhodnocení proudové hustoty 100 Hz 10 A

4.4.2 Vyhodnocení 10 A 150 Hz

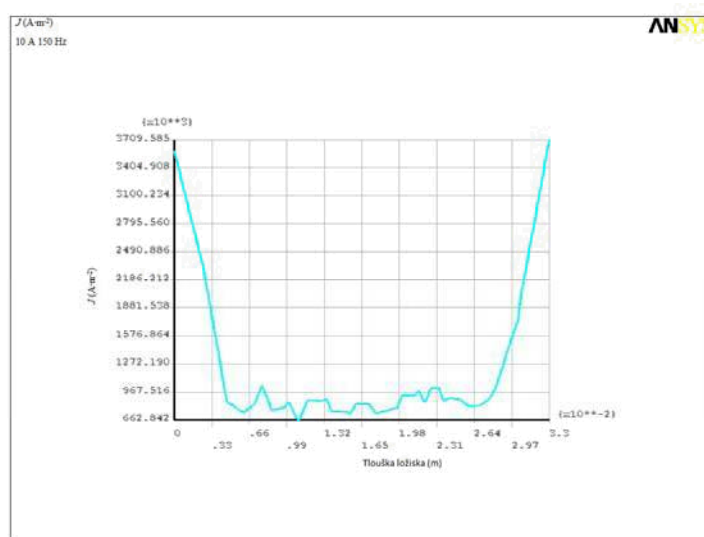
Tento model analýzy magnetické indukce, která dosahuje velikost až 1,44 T, je znázorněn na obr. č. 58. Intenzita magnetického pole ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$) dosahuje v cívce až 43 200 $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$. V ložisku, mag. obvodu a tyči až 7 200 $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$. Analýza H je zobrazena na obr. č. 59. Proudová hustota dosahuje velikosti až 3 709 ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$), viz obr. č. 60.



Obr. č. 58: Vyhodnocení magnetické indukce 150 Hz 10 A



Obr. č. 59: Vyhodnocení intenzity mag. pole 150 Hz 10 A

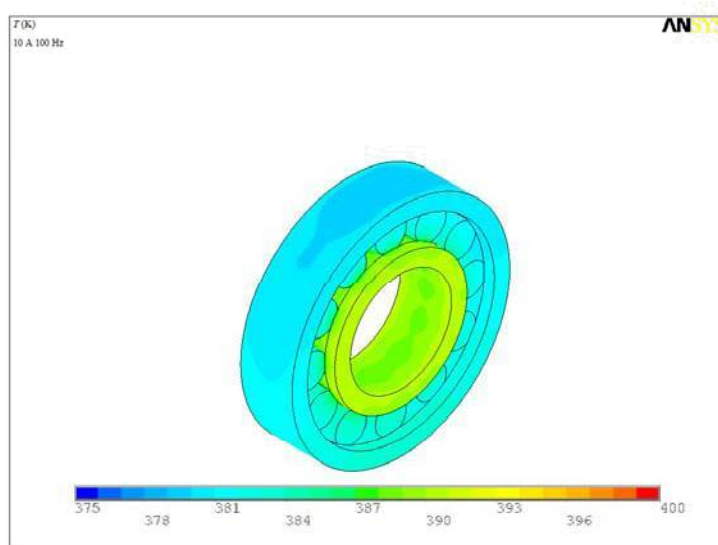


Obr. č. 60: Vyhodnocení proudové hustoty 150 Hz 10 A

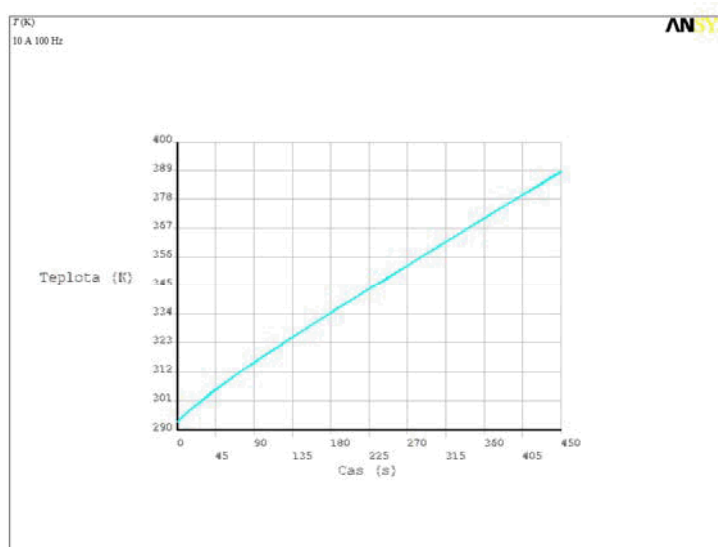
4.5 Vyhodnocení tepelné analýzy úlohy č. 2

4.5.1 Vyhodnocení 10 A 100 Hz

Na obr. č. 61 lze vidět vyhodnocení tepelné přechodné analýzy ložiska. Teplota dosahuje na vnějším povrchu ložiska 382 K, vnitřní povrch ložiska dosahuje teploty 394 K, což představuje rozdíl 12 K. Oteplovací charakteristika je zobrazena na obr. č. 62.



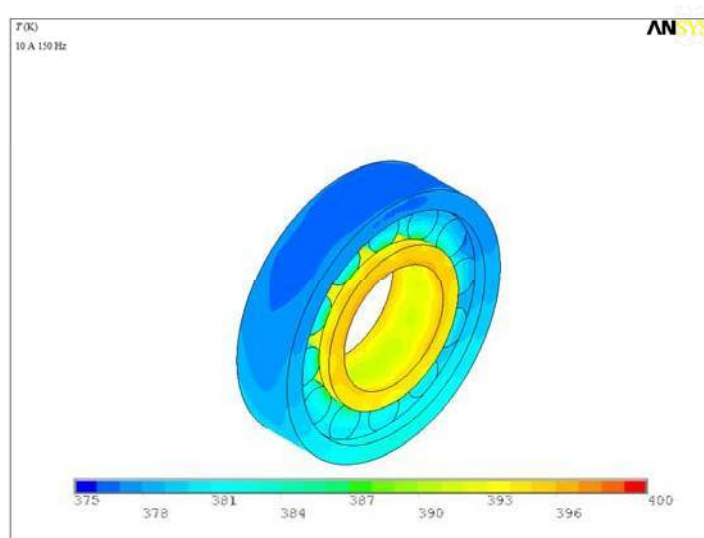
Obr. č. 61: Vyhodnocení teploty 150 Hz 10 A



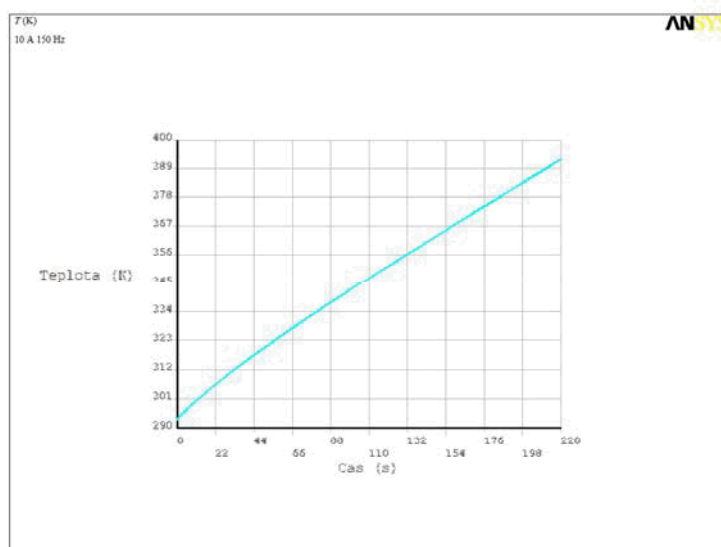
Obr. č. 62: Vyhodnocení oteplovací charakteristiky 150 Hz 10 A

4.5.2 Vyhodnocení 10 A 150 Hz

Na obr. č. 63 je vyhodnoceno ložisko v tepelné přechodné analýze. Teplota dosahuje na vnějším povrchu ložiska 375 K, vnitřní povrch ložiska dosahuje až 400 K, to znamená rozdíl 15 K. Oteplovací charakteristika je zobrazena na obr. č. 64.

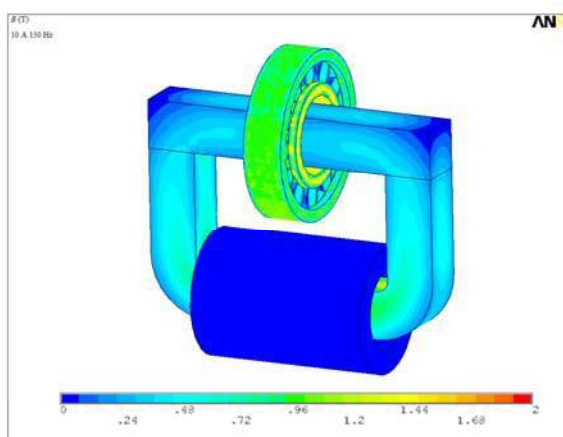
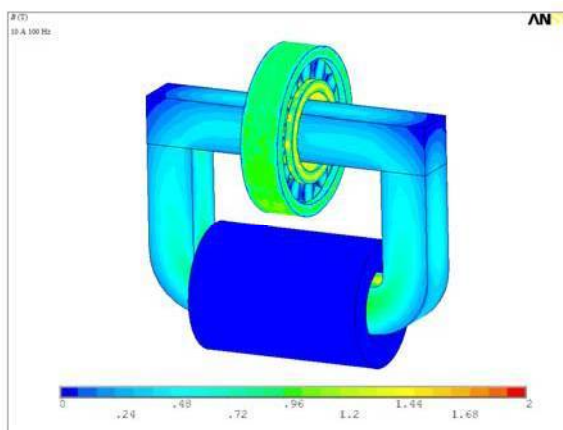
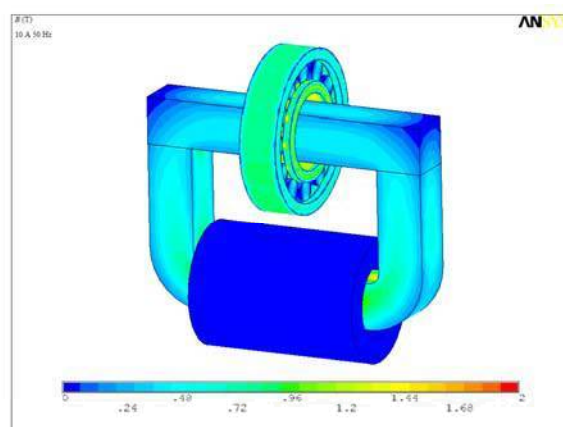


Obr. č. 63: Vyhodnocení teploty 150 Hz 10 A

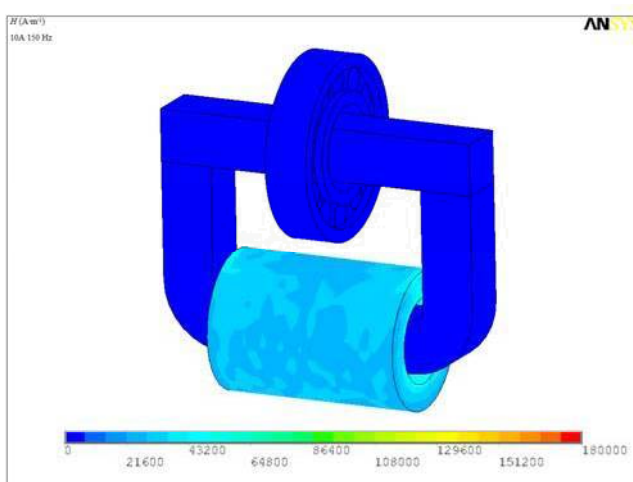
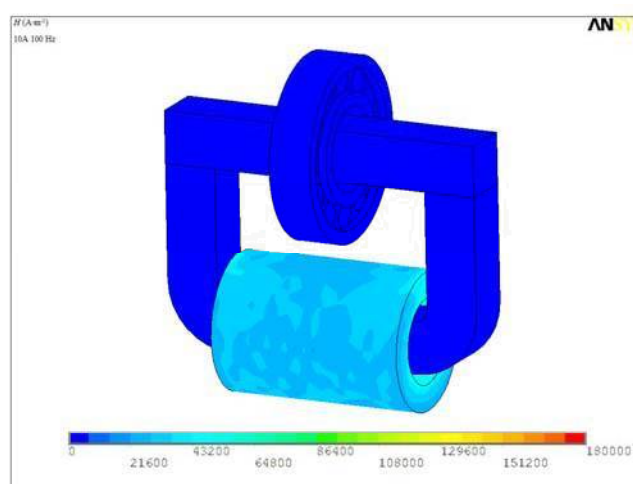
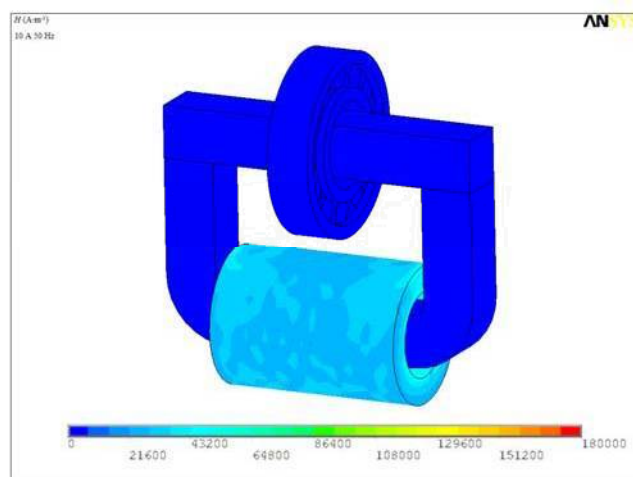


Obr. č. 64: Vyhodnocení oteplovací charakteristiky 150 Hz 10 A

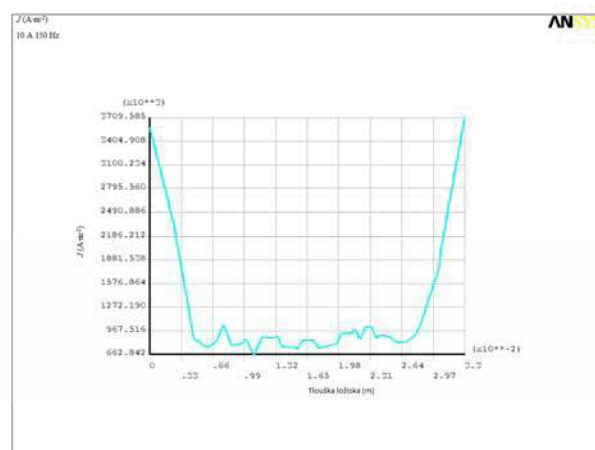
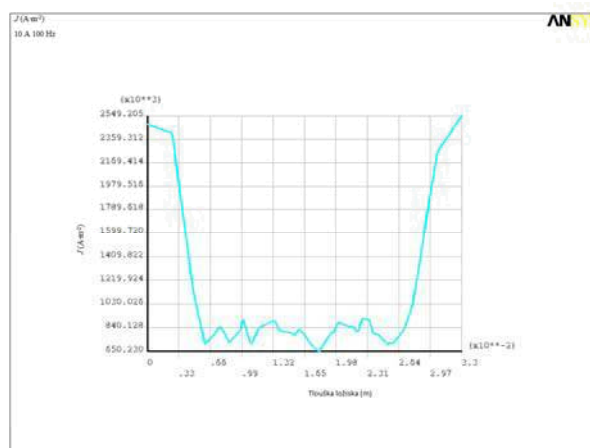
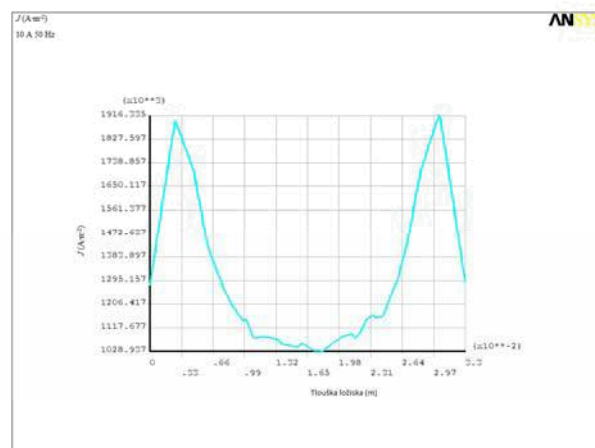
4.6 Srovnání elektromagnetické a tepelné analýzy úlohy č. 2



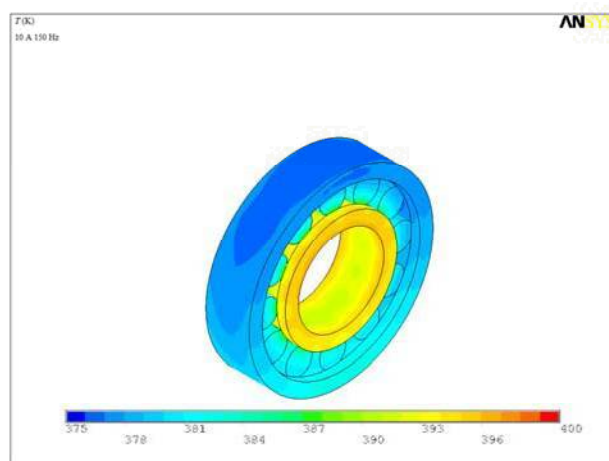
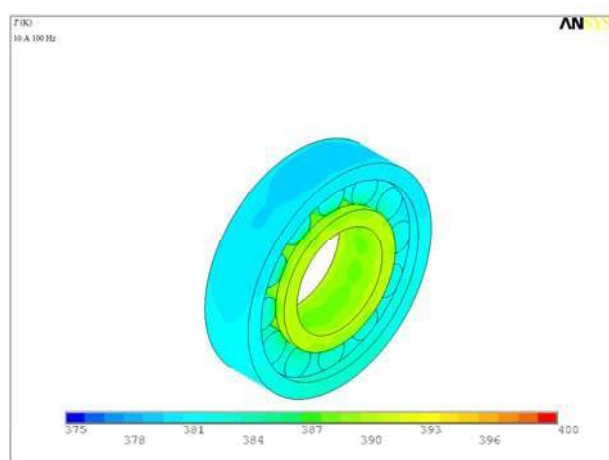
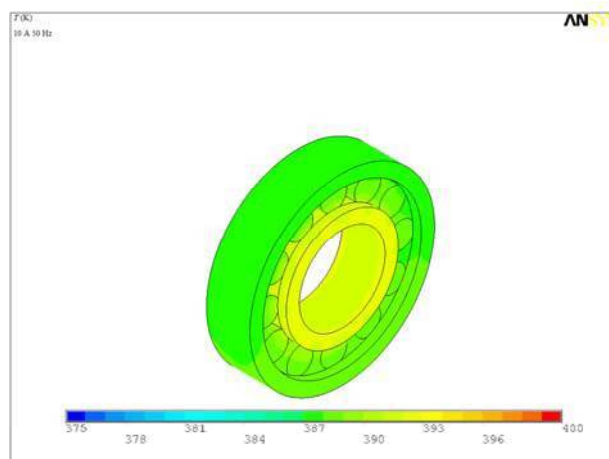
Obr. č. 65: Vyhodnocení magnetické indukce



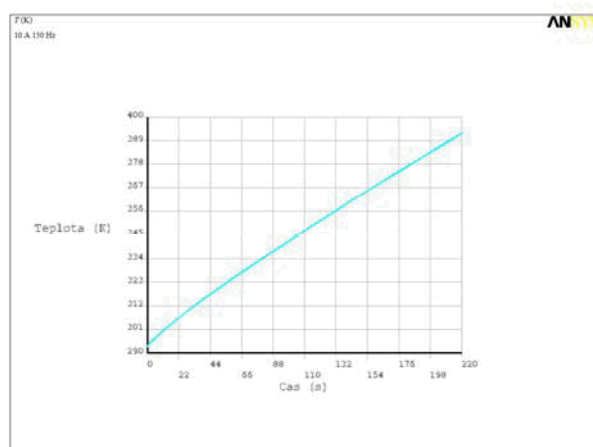
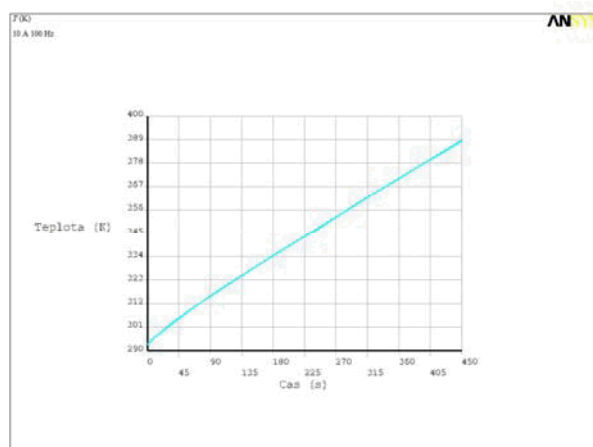
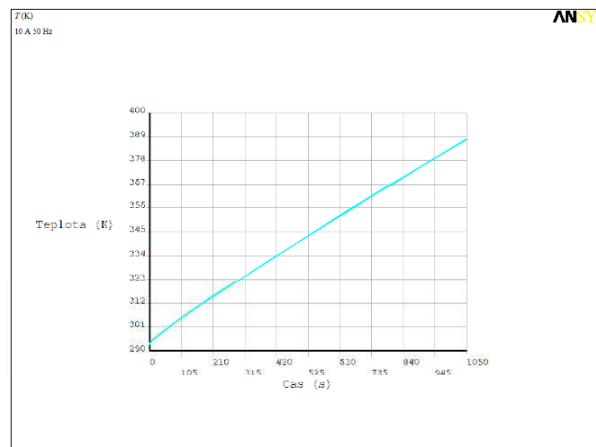
Obr. č. 66: Vyhodnocení intenzity mag. pole



Obr. č. 67: Vyhodnocení proudové hustoty



Obr. č. 68: Vyhodnocení teploty



Obr. č. 69: Vyhodnocení oteplovací charakteristiky

5 Závěr

Cílem této práce bylo analyzovat indukční ohřev. Konkrétně jsem se zaměřil na indukční ohřev ložiska. Ve své práci jsem provedl elektromagnetickou a tepelnou analýzu pomocí metody konečných prvků. Simulaci jsem vytvořil v programu ANSYS.

První část diplomové práce byla věnována teoretickým poznatkům o indukčním ohřevu. Popisoval jsem teorii elektromagnetického pole, hloubku vniku, teorii tepla. Dále jsem uvedl přehled katalogových údajů výrobců indukčních přístrojů. V praktické části jsem simuloval indukční ohřev ložiska pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS. Simulovaný model jsem vytvořil v programu CAD firmy SolidWorks. Poté jsem provedl elektromagnetickou a tepelnou analýzu. Model jsem simuloval ve vzduchovém prostředí. V elektromagnetické analýze jsem vyhodnotil intenzitu magnetického pole a magnetickou indukci. V tepelné analýze jsem vyhodnocoval přechodnou analýzu a také oteplovací charakteristiku. Na ukázkou jsem zobrazil statickou tepelnou analýzu v kapitole 4. V rámci jednoho modelu jsem realizoval dva typy úloh. V 1. úloze byla zvolena frekvence 50 Hz a proudy 10 A, 15 A, 20 A. Cílem bylo zjistit elektromagnetické veličiny a oteplovací charakteristiku. V 2. úloze jsem si vybral zatížení o proud $I = 10$ A a frekvencích 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz. Cílem bylo zjistit, jak se změní oteplovací charakteristika při různých frekvencích. Ze získaných výsledků lze z oteplovacích charakteristik vyzorovat, jak se mění rychlost ohřevu při změně buzení a zvýšení frekvence. Magnetická indukce dosahuje ve všech případech kolem 1,44 T. Intenzita mag. pole se zvyšuje s buzením cívky při stejné frekvenci, zvyšuje se budicí proud. Naopak při zvýšené frekvenci je ve výsledcích intenzita mag. pole přibližně stejná. Proudová hustota se zvyšuje s rostoucím proudem, dle teorie dosahuje exponenciálního průběhu. Na ustálené oteplovací charakteristice je vyjádřena teplota ohřívaného materiálu ložiska při přechodu do ustálené teploty. Ustálené teploty se dosáhne za 5T. V přechodné tepelné analýze je vyhodnoceno rozložení teploty ložiska, přičemž jsem zjistil, že rozložení teploty je nerovnoměrné. Závěrem lze říci, že metoda konečných prvků je velmi progresivní a má velký přínos pro simulaci v různých vědních oborech.

6 Literatura

- [1] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1964.
- [2] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Praha: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-01-04938-9.
- [3] [online]. [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el110255.pdf>
- [4] MYSLÍK, Jiří. *Elektromagnetické pole*. Praha: Nakladatelství BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-43-0.
- [5] ZIENKIEWICZ, O. C., R. L. TAYLOR a J. Z. ZHU. *The Finite Element Method: Its Basic and Fundamentals*. 6. vyd. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0-7506-6320-0.
- [6] CHARI, M. V. K a S. J. SALON. *Numerical Methods in Electromagnetism*. San Diego: Academic Press, 2000. ISBN 0-12-615760-X.
- [7] BUL, B. K. A KOLEKTIV. *Elektrické přístroje: Základy teorie*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977.
- [8] ŘÍHA, Josef. *Elektrické stroje a přístroje*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986.
- [9] [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.simatec.com/assets/Documents/1206simathermEN2.pdf>
- [11] [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://skriptum.wz.cz/autom/teplota.htm>
- [12] [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.skf.com/group/products/maintenance-products/bearing-heaters/heaters-for-mounting/induction-heaters/index.html>
- [13] [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: http://www.vkloziska.cz/editor/image/download2_soubory/betex-induction-heaters-gb-lr.pdf
- [14] [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/?q=book/export/html/45>
- [15] [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/tiny/Bc/download.pdf>

7 Příloha

I. Katalogové listy fyzikálních vlastností ložiska

ČSN 41 4109			Chromová ocel				OCEL	
STN 41 4109			pro valivá ložiska				14 109	
Chemické složení [hm. %]								
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Ni + Cu	P	S
0,90–1,10	0,30–0,50	0,15–0,35	1,30–1,65	max 0,30	max 0,25	max 0,50	max 0,027	max 0,030
Polotovary								
[1] předvalky				[4] bezešvé trubky tvářené za tepla				
[2] tyče válcované za tepla				[5] tyče tažené za studena				
[3] výkovky				[6] dráty tažené za studena				
Mechanické vlastnosti								
Polotovar	[1] [2] [3]			[4]		[5] [6]		
Rozměr t, d [mm]	–			–		–		
Stav	.3			.3		.3		
Mez kluzu R_{e} [MPa] inf.	441			–		441		
Mez pevnosti R_{m} [MPa]	608–726			608–726		628–765		
Tažnost A_5 [%] inf. podél	18			18		18		
Kontrakce Z [%] inf.	35			35		35		
Vrbová houževnatost KCU 2 [J.cm ⁻²]	–			–		–		
Tvrdost HB	max 210			max 220		max 225		
Modul pružnosti E [GPa]	213 (při 23 HRC), 210 (při 54 HRC), 202 (při 63 HRC)							
Modul pružnosti va smyku G [GPa]	–							
Teplota [°C] / tvrdost				20	200	400	600	
Modul pružnosti E [GPa] za zvýšených teplot				23 HRC	213	202	188	166
				54 HRC	210	197	182	–
Fyzikální vlastnosti								
Hustota	Měrná tepelná kapacita		Teplotní součinitel roztažnosti		Tepelná vodivost		Rezistivita	
ρ [kg.m ⁻³]	c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]		α [K ⁻¹]		λ_t [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]		ρ [Ω.m]	
7 850	480		12,5.10 ⁻⁶		37,26		256.10 ⁻⁹	